

# **Beitrag zur Simulation und Verbesserung der Vakuumdifferenzdruckinfusion**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Arne Hindersmann  
aus: Bremen

eingereicht am: 20.10.2016  
mündliche Prüfung am: 02.03.2017

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann  
Prof.em. Dr.-Ing. Helmut Schürmann

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Stade entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Felix Kruse, in seiner Zeit als Abteilungsleiter, und Herrn Dr.-Ing. Jan Stüve danke ich für die Schaffung von notwendigen Freiräumen, die die Umsetzung dieser Arbeit ermöglicht haben.

Herrn Dr.-Ing. Robert Kaps, Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Rüdiger Ruwe und Herrn Dipl.-Ing. Nico Liebers danke ich für die Unterstützung, fachlichen Diskussionen und die konstruktive Kritik.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann danke ich als Doktorvater und für die Betreuung durch die vielen fachlichen Gespräche, die die Arbeit in die richtige Richtung gelenkt haben. Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Helmut Schürmann danke ich für die Übernahme des Korreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meinen ehemaligen Studenten Herrn Constantin Bäns, B.Sc und Herrn Enzo Manuel Stegel, B.Sc. danke ich für die Unterstützung bei Versuchsreihen.

Meinen Eltern, die letztendlich durch die moralische und auch finanzielle Unterstützung die Grundvoraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben, und meiner Freundin danke ich von ganzem Herzen.



“Eine Hauptsache der Armut in den Wissenschaften ist meist eingebildeter Reichtum.  
Es ist nicht ihr Ziel, der unendlichen Weisheit eine Tür zu öffnen, sondern eine Grenze  
zu setzen dem unendlichen Irrtum. ”

*Bertolt Brecht* [15]

# Kurzfassung

In dieser Arbeit ist die Vakuumdifferenzdruckinfusion als Infusionsverfahren für Faserverbundbauteile vorgestellt worden. Bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen im Infusionsprozess wird im Allgemeinen eine Kombination aus einem festen und einem flexiblen Formwerkzeugteil genutzt. Die flexible Werkzeughälfte besteht meist aus einer Vakuumfolie. Zur Verteilung des Harzsystems und zur Imprägnierung des trockenen Fasermaterials werden Angusskanäle und Infusionshilfsstoffe verwendet. Anders als bei konventionellen Infusionsverfahren werden bei der Vakuumdifferenzdruckinfusion Kanäle verwendet, die sich außerhalb der Kavität befinden.

Die Kanäle können für die Verteilung eines Harzsystems evakuiert werden und dieser Druckunterschied führt zu einer Verformung der Vakuumfolie. Die verformte Vakuumfolie dient als temporärer Harzverteilungskanal und der Kanal wird durch Auflösen der Druckdifferenz wieder aufgelöst. Geschieht das Auflösen des Kanals innerhalb eines bestimmten Prozessfensters, bleiben auf der Bauteiloberfläche keine Kanalabdrücke zurück.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen ist eine analytische Berechnung der Folien deformation auf Basis der Membrantheorie hergeleitet worden. Mit dieser theoretischen Dimensionierung ist es möglich, die Kanalgeometrie in Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften einer Vakuumfolie und der Druckdifferenz zu bestimmen.

Des Weiteren ist ein Kanalkennwert ermittelt und verifiziert worden, mit dem ein strömungsmechanischer Vergleich zwischen konventionellen und neuen Kanalgeometrien möglich ist. Zusätzlich kann der Kanalkennwert für eine Fließsimulation genutzt werden, da es sich um eine Ersatzpermeabilität handelt.

Untersuchungen der Kanalabdrücke durch eine taktile Dickenvermessung und eine visuelle Auswertung von Schliffbildern zeigen, dass es keine Abdrücke der Kanäle auf Faserverbundbauteilen gibt. Hierbei ist eine Vielzahl an Fasermaterialien aus Glas- und Kohlenstofffasern berücksichtigt worden.

Abschließend ist ein theoretisch begründetes Prozessfenster in Abhängigkeit der Harzviskosität und der Faserpermeabilität aufgestellt worden. Zusätzlich sind die Auswirkungen von verschiedenen Hilfsstoffen, die für den Vakuumaufbau bedeutend sind, experimentell ermittelt worden. Somit sind klare Regeln für den Vakuumaufbau der Vakuumdifferenzdruckinfusion aufgestellt worden. Dieses Regelwerk und die vorgestellten Untersuchungen helfen, dass das Verfahren für zukünftige industrielle Anwendung etabliert werden kann.

# Abstract

The vacuum assisted differential pressure infusion technology is presented as an unconventional infusion method for composite parts. For the manufacturing of composite parts by infusion processes a combination of rigid and flexible tool is used. In general the flexible mold half is a vacuum bag. For the distribution of the resin and for the impregnation of the dry fabric runner channels and auxiliary materials are used. In contrast to the conventional infusion processes the channels of the vacuum assisted differential pressure infusion method are positioned at the outside of the mold cavity.

To distribute the resin the channels can be evacuated and due to the pressure difference the vacuum bag is deformed. The deformed vacuum bag is used as a temporary channel and disappears when the pressure difference is cancelled. If the pressure difference is cancelled during a specific process window no channel marks will be left on the part surface.

Within the framework of the investigations an analytical calculation of vacuum bag deformation based on the membrane theory is done. Due to this determination it is possible to calculate the channel geometry depending on the mechanical properties of the vacuum bag and the pressure difference.

Furthermore a channel value is determined and verified to compare the fluid mechanics of conventional and novel resin channels. The channel value can additionally be used to simplify a flow simulation.

The investigation of the channel marks with a tactile measurement of the thickness and a visual inspection of polished cut images has shown that the channels left no marks on the part surface. A large variety of glass and carbon fiber materials is considered for this investigation.

Finally a theoretical process window depending on resin viscosity and fiber permeability is found. In addition the influence of the auxiliary materials is determined experimentally. Therefore clear rules for the vacuum bagging of the vacuum assisted differential pressure infusion technology are established. This set of rules and the presented investigations help to introduce the process for future industrial applications.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung . . . . .	4
1.2	Gliederung der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Infusionstechnologie</b>	<b>7</b>
2.1	Infusionsverfahren nach Stand der Technik . . . . .	7
2.1.1	Infusionsverfahren . . . . .	8
2.1.2	Beispiel für die Infusion von großen Bauteilen . . . . .	13
2.2	Einflussgrößen auf die Infusionseigenschaften . . . . .	15
2.2.1	Permeabilität . . . . .	15
2.2.2	Einfluss der Viskosität und der Temperatur . . . . .	17
2.3	Laminatqualität . . . . .	18
2.3.1	Faservolumengehaltsbestimmung . . . . .	18
2.3.2	Entstehung von Poren . . . . .	19
2.4	Zusammenfassung und Ableitung wissenschaftlicher Fragestellungen . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Modellierung der Verformung einer Vakuumfolie</b>	<b>25</b>
3.1	Prinzipielle Verfahrensbeschreibung . . . . .	25
3.2	Aufstellung des mechanischen Ersatzmodells der Folienverformung . . . . .	34
3.3	Ermittlung einer theoretischen Kanalgeometrie . . . . .	37
3.4	Zusammenfassung der Modellbildung . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Ermittlung eines Kanalkennwerts</b>	<b>45</b>
4.1	Verifikation der Ersatzpermeabilität und Simulationsbeispiele . . . . .	51
4.2	Ersatzpermeabilität als Vergleichskennwert . . . . .	56
4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Auswirkungen des Verfahrens auf verschiedene Laminataufbauten</b>	<b>63</b>
5.1	Taktile Dickenvermessung . . . . .	66
5.2	Analyse der Oberflächenwelligkeit . . . . .	72
5.3	Visueller Vergleich durch eine Schliffbildanalyse . . . . .	77
5.4	Zusammenfassung der Resultate der Einzeluntersuchungen . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Anwendung des Verfahrens</b>	<b>81</b>
6.1	Prozessfenster zur Auflösung des Kanals . . . . .	81
6.2	Einfluss des Vakuumaufbaus und der Hilfsstoffe . . . . .	86

## *Inhaltsverzeichnis*

6.3 Unterteilung der großen Bauteilfläche in rautenförmige Teilbereiche . . . .	93
6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	94
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>97</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>100</b>
<b>Anhang</b>	<b>105</b>
<b>A Herleitung Verformung</b>	<b>107</b>
<b>B Spannung Membran</b>	<b>117</b>
<b>C Abschätzung des Strömungszustands</b>	<b>119</b>
<b>D Versuchsdaten Faserondulation im Kanalbereich</b>	<b>121</b>
<b>E Technische Datenblätter</b>	<b>125</b>

# Nomenklatur

## Symbole

### Lateinische Buchstaben

A	$m^2$	Fläche
a	m	Breite der Membran
B	m	Kanaltiefe für Kanalkennwert
b	m	Länge der Membran
$C_{CK}$	$m^2$	Carman-Kozeny Konstante
$c_a$	Pa s	Koeffizient für Approximation
$c_b$	1/s	Koeffizient für Approximation
$c_1, c_2$	m	Faktoren
D	N/m	Federsteifigkeit
d	m	Durchmesser
df	-	Freiheitsgrade
E	$N/m^2$	Elastizitätsmodul
f	m	Biegepfad
g	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
G	$N/m^2$	Schubmodul
$H_K$	m	Kanaltiefe
$h_V$	m	Verlusthöhe
K	$m^2$	Permeabilität
$k_{A1}$	-	Konstanten für Formänderungsarbeit
$k_{A2}, k_{A3}$	m	Konstanten für Formänderungsarbeit
$k_{A4}, k_{A5}$	$m^2$	Konstanten für Formänderungsarbeit
$k_{ci}$	-	Konstanten für $\Phi_1, \Phi_2$ (i=1...3)
$k_{fi}$	-	Konstanten für $\Theta$ (i=1...7)
$k_{\sigma i}$	-	Konstanten für Membranspannung (i=1...5)
$L_K$	m	Kanallänge
$\dot{m}$	$kg/s$	Massenstrom
n	-	Anzahl
P	m	Oberflächenprofil
p	$N/m^2$	Druck
$\hat{p}$	$N/m^2$	Druckdifferenz zwischen Atmosphären- und Harzdruck
$\Delta p$	$N/m^2$	Druckdifferenz bei Strömung
$\bar{q}$	$kg/m^2$	Flächengewicht Fasermaterial

## Nomenklatur

$Re$	-	Reynoldszahl
$r_{Hyd}$	m	hydraulischer Radius
$SE_F$	m	Standardfehler Fasermaterial
$SE_K$	m	Standardfehler Kanal
$SE_{MW}$	m	Standardfehler des Mittelwerts
$s(x)$	1/m	Gewichtsfunktion
$t_m$	m	Dicke der Membran/Folie
$t_{\alpha/2}$	-	t-Wert
$\bar{t}_F$	m	Mittelwert der Dicke des ausgehärteten Laminats
$\Delta t_{FK}$	m	Dickenänderung des Fasermaterials im Kanalbereich
$U_K$	m	Umfang Kanalquerschnitt
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$V_{Faser}$	$m^3$	Faservolumen
$V_{Harz}$	$m^3$	Harzvolumen
$V_{Laminat}$	$m^3$	Laminatvolumen
$V_{Poren}$	$m^3$	Porenvolumen
$\dot{V}$	$m^3/s$	Volumenstrom
$W$	m	Welligkeit
$W_M$	Nm	Formänderungsarbeit
$W_t$	m	Wellentiefe
$W_M^*$	Nm	spezifische Formänderungsarbeit
$y, z$	m	Koordinaten

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	%	Fehlerwahrscheinlichkeit
$\beta$	-	Verhältnis Breite zu Länge der Membran
$\gamma$	-	Gleitung
$\Delta\tau$	s	Prozessfenster
$\varepsilon$	-	Dehnung
$\zeta$	m	Verschiebung in y-Richtung
$\eta$	m	Verschiebung in z-Richtung
$\theta$	-	Folienparameter
$\lambda$	-	Rohrreibungszahl
$\lambda_{co}$	m	Cut-Off Wellenlänge
$\mu$	Pa s	dynamische Viskosität
$\nu$	-	Querkontraktionszahl
$\xi$	m	Durchbiegung der Membran
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\sigma$	$N/m^2$	Spannung
$\tau$	s	Zeit
$\tau_A$	s	Startzeitpunkt
$\tau_E$	s	Endzeitpunkt
$\tau_{yz}$	$N/m^2$	Schubspannung
$\Phi_1, \Phi_2$	-	Faktoren für $c_1$ und $c_2$

$\Phi_{\sigma 2}$	-	Faktor für Membranspannung
$\varphi_a$	-	maximaler Faservolumengehalt
$\varphi_F$	-	Faservolumengehalt
$\varphi_0$	-	minimaler Faservolumengehalt
<b>Indizes</b>		
A		Atmosphäre betreffend
AK		Änderung der Dicke im Kanalbereich
Darcy		Gesetzmäßigkeiten von Darcy betreffend
E		Ersatz
E, Kanal		Ersatz Kanal betreffend
E, $\varphi$		Ersatz in Abh. des Faservolumengehalts
F		Faser/Laminat betreffend
FK		Fasermaterial im Kanalbereich betreffend
G		Gesamt
GE		Gesamt Ersatz
Hyd		Hydraulisch
i		generelle Indizierung
K		Kavität betreffend
K, Kreis		Kanal mit Kreisquerschnitt
max		Maximum betreffend
min		Minimum betreffend
R		Harz betreffend
SK		Spiegel/Niveau Kanal betreffend
V		Verlust betreffend
VK		Vakuumkanal betreffend
0		Atmosphärendruck betreffend
1/2		Zwischen erster und zweiter Vakuumfolie



## **Abkürzungen**

AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
CAPRI	Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion
CARTM	Channel Assisted Resin Transfer Molding
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CTC	Composite Technology Center GmbH
DFP-WC	Dry Fiber Placement Wingcover (abgeschlossenes Projekt)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DPI	Dynamic Pulsed Infusion
FASTRAC	Fast Remotely Actuated Channel
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
PAG	Premium Aerotec
PMMA	Polymethylmethacrylat
RTI	Resin Transfer Infusion
RTM	Resin Transfer Molding
SCRIMP	Seeman's Composite Resin Infusion Molding Process
SPI	Static Pulsed Infusion
VAP	Vacuum Assisted Process
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
VIPR	Vacuum Induced Preform Relaxation

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Grafische Darstellung der Gliederung . . . . .	6
2.1	Dickenänderung des Fasermaterials durch Änderung der Druckdifferenz bei der Vakuuminfusion. Der dargestellte Konturverlauf ergibt sich aus der Überlagerung der abnehmenden Komprimierung des Fasermaterials und dem Verlauf des Druckgradientens durch das einströmende Harz (in Anlehnung an [17]) . . . . .	7
2.2	Schematischer Aufbau des VARI/VARTM/SCRIMP Verfahrens . . . . .	8
2.3	Schematischer Aufbau des VAP Verfahrens (in Anlehnung an [24]) . . . . .	9
2.4	Schematischer Aufbau des VIPR Verfahrens a) Vakuumkammerdruck entspricht Umgebungsdruck b) Vakuumkammerdruck ist geringer als der Druck unterhalb der Vakuumfolie (in Anlehnung an [3]) . . . . .	10
2.5	Schematische Darstellung des CAPRI- Verfahrens (in Anlehnung an [48]) . . . . .	11
2.6	Schematische Darstellung des RTI Verfahrens (in Anlehnung an [14]). Links: Zustand für die Infusion; Rechts: Autoklavdruck drückt überschüssiges Harz aus der Kavität . . . . .	11
2.7	Schematische Darstellung des CARTM Verfahrens mit geschlossenem und geöffneten Kanal (in Anlehnung an [43]) . . . . .	12
2.8	Infusionsaufbau an einer Halbschale eines Windkraftrotorblatts. . . . .	14
2.9	Infusion eines Bootsrumpfs [16] . . . . .	14
2.10	Infiltrierte Flügelschale aus dem Projekt DFP-WC . . . . .	15
2.11	Unidirektionale Fließmethode a) transientes Verfahren b) stationäres Verfahren (in Anlehnung an [47]) . . . . .	17
2.12	Radiale Fließmethode (in Anlehnung an [42])) . . . . .	17
2.13	Viskosität in Abhängigkeit der Zeit und Temperatur (in Anlehnung an [23]) . . . . .	18
2.14	Entstehung von Poren bei niedriger und hoher Fließgeschwindigkeit . . . . .	20
2.15	Kategorisierung der einzelnen Infusionsverfahren nach der Art der Harzverteilung und nach der Positionierung der Harzverteilungshilfsmittel (innerhalb oder außerhalb der Kavität). . . . .	21
2.16	Abdruck von Angusskanälen auf einer Rotorblatthalbschale (rote Markierung) . . . . .	23
2.17	Schematische Darstellung der Infusion eines Dickensprungs mit Fließhilfe . . . . .	23
2.18	Schematische Darstellung der Infusion eines langen Bauteils . . . . .	23
3.1	Schematische Darstellung des Verfahrensablaufs bei der Vakuumdifferenzdruckinfusion . . . . .	26

3.2	Schematische Darstellung des Differenzdrucks. a) Ausgangszustand ohne Differenzdruck ( $\hat{p}_a = 0$ ), b) Evakuierung der Kavität ( $\hat{p}_b < 0$ ), c) Evakuierung des Kanals ( $\hat{p}_c > \hat{p}_b$ ), d) Während der Infusion ( $\hat{p}_d > \hat{p}_c > 0$ ) . . . .	27
3.3	Schematischer Versuchsaufbau für die Untersuchung der Druckvariation .	28
3.4	Gemessene Harzmenge (oben) und daraus ermittelter Massenstrom (unten) bei der Variation des Drucks im Kanal. ( $p_{VK}$ ist als Absolutdruck angegeben) . . . . .	29
3.5	Fließverhalten bei der Nutzung eines Kanals ohne Fließhilfe (links), bei der Nutzung einer Kombination aus Kanal und Fließhilfe (mitte) und nur Fließhilfe (rechts) . . . . .	30
3.6	Links: Eingebraachte Riefen in der Vakuumfolie zur Ermittlung des Folienrutschens aufgrund der Einspannbedingungen an den Kanalrändern. Rechts: Schematische Darstellung des Versuchs im unbelasteten (oben) und belasteten Zustand (unten). . . . .	31
3.7	Eingebraachte Riefen in der Metallfolie zur Ermittlung des Folienrutschens aufgrund der Einspannbedingungen an den Kanalrändern. Links: linker Kanalrand. Rechts: rechter Kanalrand . . . . .	32
3.8	Links: Reinharzrückstand durch plastische Verformung der Vakuumfolie Rechts: Nicht an die Folienverformung angepasste Kanalgeometrie . . . .	33
3.9	Links: Fließfrontfortschritt und Beeinflußung der Fließfront durch Druckanpassung (Überlagerung von mehreren Bildern zu unterschiedlichen Zeitpunkten $\tau_1$ bis $\tau_4$ der Infusion); Rechts: Schematische Darstellung der Folienverformung in Kanallängsrichtung und Druckverhältnisse. . . . .	34
3.10	Mechanisches Ersatzmodell für den Membranstreifen . . . . .	36
3.11	Die Kanalquerschnittsfläche $A_K$ , die Kanalbreite $a$ und der Biegepfeil $f$ in Abhängigkeit des Differenzdrucks $\hat{p}$ . . . . .	38
3.12	Konstruktionsbeispiel für einen aufgesetzten Kanal (für eine Vakuumfolie mit den Eigenschaften $E = 2700 \text{ N/mm}^2$ , $t_m = 0,1 \text{ mm}$ , $\nu = 0,25$ , $\sigma = 60 \text{ N/mm}^2$ und einen Differenzdruck $\hat{p} = 650 \text{ mbar}$ ). . . . .	39
3.13	Dickenänderung im Kanalbereich für 40 Lagen Hexcel Injectex G0926. .	40
3.14	Herstellung eines Stufenkeils zur experimentellen Bestimmung der Dickenänderung des Fasermaterials im Kanalbereich . . . . .	41
3.15	Dickendifferenz zwischen Dickenänderung im Kanalbereich und Laminatdicke (Fasermaterial Hexcel G0926, Lagenaufbau [0/90] <sub>s</sub> ; Kanalbreite $2a=32\text{mm}$ in Schwarz und Kanalbreite $4a=64\text{mm}$ in Blau dargestellt). Die Punkte geben die einzelnen Messpunkte wieder. . . . .	42
3.16	Dickendifferenz zwischen Dickenänderung im Kanalbereich und Laminat .	42
3.17	Größenvergleich zwischen den Kanälen . . . . .	43
3.18	Vergleich zwischen aktiviertem und nicht aktiviertem Binder . . . . .	43
4.1	Flächen- und Massenstromaufteilung . . . . .	46
4.2	Ersatzquerschnittsfläche für Kanal mit Kreisabschnittsquerschnitt . . . .	50
4.3	Ersatzquerschnittsfläche für Kanal mit Kreisquerschnitt . . . . .	51

4.4	Vergleich der Kanalfüllzeiten zwischen Kanal mit Fasermaterial (links) und der Ersatzpermeabilität (rechts). Der geringe zeitliche Unterschied kann mit der inhomogenen Harzzuführung durch einen Punktanguss bei der Ersatzpermeabilität begründet werden. . . . .	53
4.5	Füllzeit in Abhängigkeit des Faservolumengehalts im Kanalbereich, wenn kein Reinharzanteil vorhanden ist ( $A_K = 0$ ) . . . . .	55
4.6	Ersatzquerschnittsfläche für Kanal mit Kreisquerschnitt und Kreisabschnittsquerschnitt . . . . .	57
4.7	Schematische Darstellung zum Ablauf der iterativen Bestimmung der Kanalgeometrie . . . . .	57
4.8	Simulierte Harzmenge in Abhängigkeit der Füllzeit für Plattenlänge 650mm (oben) und Plattenlänge 1300mm (unten) . . . . .	60
4.9	Fließfront, die sich radial um den Punktanguss ausbildet und daher zu minimal größerer Füllzeit bei der Simulation der Ersatzpermeabilität führt. 60	
5.1	Kanalabdrücke durch Omegakanal bei Köper-, Leinwandgewebe, Biaxial- und Unidirektionalgelege. Der Omegakanal bzw. dessen Bereich ist in grau angedeutet. . . . .	64
5.2	Kanalabdruck hervorgerufen durch Kanäle, die auf gelochten Blechen positioniert sind und mit Fließhilfe kombiniert werden. . . . .	64
5.3	Oben: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Dicken zwischen dem ungestörten Laminatbereich (jeweils linker Balken in hellblau) und dem Kanalbereich (jeweils rechter Balken in dunkelblau) der Platten aus <b>Körpergewebe</b> . Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Unten: Dicken-differenz $\Delta t_{FK}$ der Mittelwerte für jede Platte. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall. . . . .	67
5.4	Oben: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Dicken zwischen dem ungestörten Laminatbereich (jeweils linker Balken in hellblau) und dem Kanalbereich (jeweils rechter Balken in dunkelblau) der Platten aus <b>Biaxialgelege</b> . Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Unten: Dicken-differenz $\Delta t_{FK}$ der Mittelwerte für jede Platte. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall. . . . .	68
5.5	Oben: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Dicken zwischen dem ungestörten Laminatbereich (jeweils linker Balken in hellblau) und dem Kanalbereich (jeweils rechter Balken in dunkelblau) der Platten aus <b>Leinwandgewebe</b> . Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Unten: Dicken-differenz $\Delta t_{FK}$ der Mittelwerte für jede Platte. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall. . . . .	69
5.6	Oben: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Dicken zwischen dem ungestörten Laminatbereich (jeweils linker Balken in hellblau) und dem Kanalbereich (jeweils rechter Balken in dunkelblau) der Platten aus <b>Unidirektionalgelege</b> . Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Unten: Dicken-differenz $\Delta t_{FK}$ der Mittelwerte für jede Platte. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall. . . . .	70

5.7	Schematische Darstellung der Stapelung von Einzelschichten und daraus resultierende Welligkeiten. . . . .	73
5.8	Oberflächentopologie am Beispiel des Köpergewebes GFK 166 $g/m^2$ . . . .	74
5.9	oben: Über Probertiefe gemittelttes Primärprofil (grüne Linie) unten: Welligkeit ermittelt durch Gaußfilter; für Köpergewebe GFK 166 $g/m^2$ . . . .	75
5.10	Schliffbilder Köpergewebe . . . . .	78
5.11	Schliffbilder Leinwandgewebe . . . . .	78
5.12	Schliffbilder Biaxialgelege . . . . .	79
5.13	Schliffbilder Unidirektionalgelege . . . . .	79
6.1	Schematische Darstellung des Analogiemodells zur Abschätzung der Entleerungszeitspanne des Kanals. Das Analogiemodell aus der Fluidmechanik ist ein Behälter der durch eine Öffnung am Bodenrand entleert wird. . . .	82
6.2	Schematische Darstellung des Viskositätsverlaufs bei einem isothermen Prozess mit Grenzviskosität bzw. Gelpunkt. $\Delta\tau$ beschreibt den Zeitraum für das Prozessfenster und $\tau_A$ ist der späteste Zeitpunkt zum Belüften des Kanals. $\tau_E$ gibt den Gelzeitpunkt bzw. das Erreichen der Grenzviskosität an. . . . .	83
6.3	oben: Viskositätsverlauf (Sicomin SR8100/SD8822 isotherm bei 50°C) mit $c_a = 36,165 \text{ mPa} \cdot s$ , $c_b = 1,01 \text{ 1/s}$ Residuum $R=0,998$ ; unten: Anfangszeitpunkt zum Belüften $\tau_A$ in Abhängigkeit des Fließwegs bis zur Spülkavität $L_F$ mit $\varphi_F = 0,5$ , $2a = 30 \text{ mm}$ , $H_K = 2,7 \text{ mm}$ , $t_F = 2 \text{ mm}$ , $p_0 = 0,1 \text{ MPa}$ , $p_1 = 0 \text{ MPa}$ , $\tau_E = 4000 \text{ s}$ und $K = 1,84 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2$ . Je länger der Fließweg ist, desto eher muss der Kanal belüftet werden. . . . .	85
6.4	Versuchsanordnungen, die sich voneinander ableiten lassen. . . . .	86
6.5	Schematische Darstellung des grundlegenden Versuchsaufbaus zum Vergleich der Infiltrationszeiten. . . . .	87
6.6	Komplexe Vakuumaufbauten mit Faltenbildung in der Vakuumfolie (links: Innenschale B-Säule, rechts: Reserveradmulde). . . . .	88
6.7	Aufweitung der Falte im Kanalbereich. Oben: Darstellung der Position des Kanals zur Falte. Links: Schematische Darstellung der Folienaufweitung in der Schnittansicht. Rechts: Folienaufweitung gezeigt an einem transparenten Kanal mit eingefärbtem Harz . . . . .	89
6.8	Schematische Darstellung zur Verdeutlichung des Verhaltens bei der Verwendung von zwei Vakuumfolien. a) Nur eine Vakuumfolie; b) Bereich zwischen den Vakuumfolien nicht evakuiert, sodass der Druck zwischen den Vakuumfolien $p_{1/2}$ dem Atmosphärendruck $p_0$ entspricht; c) Bereich zwischen den Vakuumfolien evakuiert, sodass der Druck zwischen den Vakuumfolien $p_{1/2}$ dem Druck in der Kavität $p_K$ entspricht; d) Kavität füllt sich mit Harz, sodass der Druck in der Kavität auf den Druck des Harzes $p_R$ ansteigt. Durch den wesentlich geringeren Druck $p_{1/2}$ werden die Folien aufeinander gedrückt. . . . .	91

6.9	Infusionsversuch mit zwei Vakuumfolien und einem Entlüftungsvliesstreifen, der den Harzverteilungskanal kreuzt, zwischen erster und zweiter Folie. Links: Einschnürung der Fließfront im Bereich des Entlüftungsvliesstreifens zu Beginn der Infusion. Rechts: Ausgleich der Einschnürung mit fortschreitender Infusionszeit (ca. 5 min. später als linkes Bild). . . . .	92
6.10	Vergleich der Infusionszeiten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. (Datenbasis aus [60]) . . . . .	92
6.11	Rautenförmige Angusskanalanordnung mit Spülkavität. . . . .	93
6.12	Rautenförmige Angusskanalanordnung in Kombination mit einer VAP-Membran. Die Fließfront ist durch Infrarotbilder sichtbar gemacht worden. . . . .	94
A.1	Mechanisches Ersatzmodell für die Ermittlung der Membranverformung .	108
A.2	Die Faktoren $\Phi_1$ und $\Phi_2$ in Abhängigkeit der Querkontraktionszahl $\nu$ und des Seitenverhältnisses $\beta$ . . . . .	111
A.3	Der Faktor $\Theta_\beta(\beta, \nu)$ in Abhängigkeit der Querkontraktionszahl und des Seitenverhältnisses ( $\Theta_\beta(\beta = 0, \nu) = \Theta(\nu)$ )(Gleichung siehe Anhang A) . .	114
A.4	Der Biegepfel $f$ in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses $\beta$ , für eine Membran mit $E = 2700 N/mm^2$ , $t_m = 0,05 mm$ , $\nu = 0,25$ , $\hat{p} = 0,075 N/mm^2$ .	115
C.1	Fließgeschwindigkeit für eine Reynoldszahl von $Re=2300$ (blauer Bereich laminare Strömung) . . . . .	120
D.1	Fertigungsaufbau für die Ermittlung des Kanalabdrucks . . . . .	121
D.2	Viskositätsverlauf des Epoxidharzes Sicomin SR8100/ SD8822 in Abhängigkeit der Zeit . . . . .	122
D.3	Viskositätsverlauf des Epoxidharzes Sicomin SR8100/ SD8822 in Abhängigkeit der Temperatur. Die Anfangsviskosität beträgt 80mPas (bei 50°C). .	123
D.4	Messpunkte der taktilen Vermessung . . . . .	124

# 1 Einleitung

Faserverbundwerkstoffe sind ideale Leichtbaumaterialien, da sie hohe Festigkeiten und hohe Steifigkeiten mit einer niedrigen Dichte vereinen. Durch diese Eigenschaften werden Faserverbundwerkstoffe im Bereich von hochbelasteten Strukturen eingesetzt, die außerdem besonderen Gewichtsrestriktionen unterworfen sind. Beispiele hierfür finden sich besonders in der Luft- und Raumfahrt, aber auch im Bereich des bodengebundenen Verkehrs, des Bootsbaus, der Sportindustrie und der erneuerbaren Energien.

Ein zunehmender Kostendruck in der Windkraft- und Luftfahrtindustrie macht es notwendig kostengünstigere Herstellungsprozesse für die zum Teil sehr großen Faserverbundbauteile zu etablieren. Die wirtschaftliche Infiltration eines flüssigen Harzsystems in ein ungesättigtes Fasermaterial setzt Hilfsmittel und Infusionsstrategien voraus, mit denen zum einen die geforderte Laminatqualität erreicht und zum anderen eine Reduzierung von Hilfsstoffen und Harzverbrauch erzielt wird. Häufig wird bei den herkömmlichen Infusionsverfahren zur Erhöhung des Fließwegs und der Fließgeschwindigkeit eine Fließhilfe verwendet, die für das Harz einen geringen Fließwiderstand darstellt. Ein Vorteil dieses Hilfsmittels ist es, dass die zum Teil sehr großen Faserverbundbauteile zusätzlich in Laminatdickenrichtung durchtränkt werden. Allerdings wird auch zusätzliches Harz benötigt, das nach der Infusion mit der Fließhilfe wieder vom Bauteil entfernt werden muss. Somit ist das zusätzliche Harz nur für den Infusionsprozess notwendig, trägt aber aus mechanischer Sicht nicht zum fertigen Bauteil bei. Damit lange Fließwege trotzdem erzielt werden können, werden auch häufig mehrere Harzverteilungskanäle verwendet. Diese Kanäle müssen dann allerdings auf der Bauteiloberfläche positioniert werden. Prozessbedingt werden durch die Kanäle Abdrücke auf der Bauteiloberfläche hinterlassen, die zu Faserondulationen führen. Hierdurch werden lokale Störungen im Laminat hervorgerufen, die zu einem vorzeitigen Versagen des Bauteils führen können. Dies betrifft vor allem Areale in denen eine Druckbeanspruchung des Laminats auftritt und führt zu der Versagensform des Schubknickens. Bei der Vakuumdifferenzdruckinfusion werden wiederverwendbare Harzverteilungskanäle verwendet, die keinen direkten Kontakt zum Infusionsharz haben. Außerdem bietet das Verfahren das Potential, Kanäle für die Infusion direkt auf dem Bauteil zu platzieren, ohne gravierende Abdrücke auf dem ausgehärteten Bauteil zu hinterlassen.

Dieses Infusionsverfahren bietet für die Luftfahrt- und Windkraftindustrie eine Option, den Herstellungsprozess zu verbessern, da die Kanäle die Möglichkeit schaffen, Fließfronten zu beeinflussen und zu steuern und das Verfahren somit eine direkte Verbesserung der Laminatqualität nach sich zieht.

### Luftfahrt

Die Luftfahrt setzt für große Faserverbundstrukturbauteile, wie Flügel- oder Rumpfschalen, zurzeit hauptsächlich vorimprägniertes Fasermaterial (Prepreg) ein. Dies liegt zum einen an den guten mechanischen Kennwerten und zum anderen an der Prozesssicherheit, die mit der Automatisierung im Ablegeprozess einhergeht.

Trotz des hohen Automatisierungsgrads der Ablegeprozesse und der Toleranz der Luftfahrtindustrie gegenüber den Mehrkosten pro eingespartem Kilogramm Masse, werden zukünftig neue Fertigungsverfahren zur Kostenminimierung nötig. Seit langem ist bekannt, dass Infusionsprozesse zur Kosteneinsparung genutzt werden können. [57]

Die Vorteile der Infusionstechnologie liegen zunächst im Bereich der Lagerung und Logistik der Halbzeuge. Prepregmaterialien müssen tiefgekühlt (bei  $-18^{\circ}\text{C}$ ) gelagert und transportiert werden, um die Härtungsreaktion zu unterdrücken. Wohingegen das typische Luftfahrt-Harz Hexcel RTM6 als Zweikomponentenharzsystem lediglich gekühlt (bei  $+5^{\circ}\text{C}$ ) gelagert wird.

Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von trockenen Fasermaterialien liegt in der Prozessgestaltung. Für die Aushärtung von Prepregs müssen an das Material angepasste Aufheizrampen eingehalten werden. Ausschlaggebend ist hierbei nicht der Faser-, sondern der Matrixwerkstoff. Im Gegensatz dazu können die Temperaturgradienten beim Aufheizen bei der Verwendung von Infusionsharzen, zumindest bis zum Erreichen der Infusionstemperatur, größer sein. Limitativ sind hierbei nur die thermische Masse der Formwerkzeuge und die Leistung der Wärmequelle. Somit kann die Zykluszeit verkürzt werden.

Auch die Vermeidung von Fertigungsabfällen spielt eine Rolle. Bei Prepregmaterialien, die wie trockenes Fasermaterial in aufgerollter Form vertrieben werden, ist eine Folie (*cover foil*) notwendig, damit die aufgerollten Lagen nicht miteinander verkleben. Diese Folie ist mit unausgehärtetem Harz kontaminiert und muss entsorgt werden.

Der Kosteneinsparung durch die Vakuuminfusion stehen jedoch, insbesondere in der Luftfahrtindustrie, die weitgehend besseren mechanischen Eigenschaften der Prepregmaterialien entgegen. Zum Erreichen einer vergleichbaren Bauteilgüte muss zum Teil ein Mehrgewicht bei Infusionsbauteilen akzeptiert werden. Jedoch zeigen Forschungsergebnisse, dass durch den Einsatz von z.B. Nanopartikeln die mechanischen Eigenschaften der Infusionsbauteile gesteigert werden können. [55, 65]

Mittlerweile werden bereits für zivile Flugzeuge Komponenten in Infusionsprozessen hergestellt. Ein Beispiel hierfür ist der Flügel der Bombardier CS 100 [44]. Für die Boeing 787 wird das hintere Druckschott im *Vacuum Assisted Process* (VAP) von der Firma Premium Aerotec (PAG) infundiert [20] und für die Irkut MC21 werden ebenfalls die Flügel als Infusionsbauteile hergestellt [45]. Für die Boeing 787 sind zusätzlich die *Flaperons* (Kombination aus Klappe und Querruder), Querruder, Klappen (*flaps*) und die Spoiler als Infusionsbauteile anzuführen [27].



## Windkraft

In der Windkraft sind große Faserverbundbauteile in Form von Rotorblättern stark vertreten. Vorzugsweise wird bei der Fertigung der Rotorblätter die Vakuuminfusionstechnologie eingesetzt.[29] Damit die Fertigung der immer länger werdenden Rotorblätter auch zukünftig umsetzbar bleibt, müssen die Herstellungskosten sinken und das Fertigungsverfahren den steigenden Qualitätsansprüchen angepasst werden.[33]

Für die Herstellung von Rotorblättern werden meist Hilfsstoffe zur Verteilung des Harzes, wie Fließhilfe, verwendet. Diese muss vor der Infusion auf die Preform aufgebracht und auf die Laminatdicke abgestimmt werden. Teilweise ergibt sich eine unkontrollierte Verteilung des Harzes über die Bauteiloberfläche während der Imprägnierung. Die Folge sind Fehlstellen durch Lufteinschlüsse oder trockene Bereiche, die anschließend aufwendig repariert werden müssen. Außerdem muss die Fließhilfe mit Harz getränkt werden und verbraucht somit zusätzliches Harz.

Nicht nur in den bereits adressierten Industriezweigen wird eine Fließsimulation als Hilfsmittel eingesetzt, sondern auch im Bootsbau ist dies bereits der Fall. Die Fließsimulation, also die Vorhersage wie sich das Harz während der Infiltration verteilt, erleichtert die Ermittlung der Angussstrategie. Des Weiteren sind Infusionsverfahren bekannt, bei denen verschiedene Angüsse und Drainagen nach Bedarf geöffnet und geschlossen werden können [13, 46]. Somit können Fließfronten zwar beeinflusst und vorhergesagt werden, aber ein direkter Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit ist nicht möglich. Durch herstellungs- und drapierbedingte lokale Änderung der Permeabilität kann während der Infiltration nur begrenzt eingegriffen werden, da die Permeabilitätsänderungen nur schwer in die Fließsimulation einzubinden sind. [40]

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Kosten ist die Bauteilqualität und damit auch die Qualitätssicherung. Hierdurch können Nacharbeiten, Reparaturen und Ausschussbauteile vermieden werden.

Es ist zu erkennen, dass sowohl in der Luftfahrt als auch in der Windkraft die Etablierung bzw. die Verbesserung des Infusionsverfahrens vorteilhaft ist. Um den aufgezeigten Nachteilen:

- Kosten des Prepregmaterials
- lange Zykluszeiten
- zusätzlicher Harzverbrauch
- und mangelnde Qualitätssicherung

der konventionellen Verfahren entgegenzuwirken, soll das neue Infusionsprinzip untersucht werden. Das Prinzip nutzt hierbei die Beeinflussung der Permeabilität von Fasermaterialien durch einen Differenzdruck.

### 1.1 Zielsetzung

Bei konventionellen Infusionsverfahren werden Anguss- bzw. Harzverteilungs Kanäle verwendet, die sich innerhalb einer Kavität befinden. Diese Kavität wird aus einer Vakuumfolie und einem starren Formwerkzeug gebildet. Die Vakuumdifferenzdruckinfusion nutzt hingegen Harzverteilungs Kanäle die außerhalb einer Kavität positioniert werden und durch einen Differenzdruck zwischen Kavität und Kanal temporär aktiviert werden können. Durch einen geringeren Druck im Kanal als in der Kavität wird die Vakuumfolie im Kanalbereich verformt. Der geringere Druck vergrößert im Kanalbereich die Permeabilität des Fasermaterials und sorgt in Abhängigkeit der Kanalgeometrie für einen zusätzlich überlagerten Harzkanal. Dieser Verfahrensansatz ist 2007 von van Herpt [36] patentiert worden.

Die Idee temporäre Angusskanäle durch einen Differenzdruck zwischen Folie und Kanal herzustellen, ist zwar nicht neu, jedoch sind viele Aspekte und Effekte, die für die gezielte Anwendung des Verfahrens notwendig sind, noch nicht untersucht worden. Daher hat die vorliegende Arbeit das Ziel, die grundlegende Basis für die zukünftige Vermeidung von Fertigungsabfällen bei der Infusion zu schaffen. Und im Gegensatz zum Verfahren nach van Herpt [36], soll zusätzlich zur Beeinflussung der Faserpermeabilität auch ein Reinharzanteil im Kanalbereich zur Imprägnierung genutzt werden können.

### 1.2 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst auf den Stand der Technik eingegangen und werden die aus der Literatur bekannten Infusionsverfahren und Einflussgrößen vorgestellt. Die vorgestellten Infusionsverfahren werden zusammenfassend kategorisiert und mit Hilfe dieser Kategorien werden wissenschaftliche Fragestellungen in Form von Hypothesen zur Verbesserung des Stands der Technik abgeleitet. Hierbei gilt als wichtiges Ziel die Vermeidung von Fertigungsabfällen.

Die prinzipielle Verfahrensbeschreibung und die Aufstellung eines Modells zur analytischen Beschreibung der Folienverformung bilden das Kapitel 3. Die Verformbarkeit der Vakuumfolie ist in diesem Fall hauptsächlich für die Erzeugung eines temporären Angusskanals von Interesse. Hierzu wird ein Modell für die Verformung aufgestellt und idealisiert. Mit einem analytischen Ansatz kann die theoretische Verformung der Vakuumfolie ermittelt und damit der Kanalquerschnitt in Abhängigkeit des Drucks bestimmt werden. Allerdings spielt hierbei auch das Verhalten des Fasermaterials im Kanalbereich eine Rolle. Durch den geringeren Umgebungsdruck wird das Fasermaterial im Kanalbereich dekomprimiert und verringert somit die Querschnittsfläche des Reinharzanteils im Angusskanal. Durch eine Versuchsreihe wird die grundlegende Vorgehensweise zur Ermittlung der Querschnittsfläche dargestellt und eine Möglichkeit zur Verhinderung der Aufdickung vorgestellt.

In Kapitel 4 wird ein Kanalkennwert ermittelt, der die Auslegung von Angussstrategien für die Vermeidung von Infusionshilfsstoffen ermöglicht. Bei der Auslegung einer Angussstrategie unterstützt meistens eine Fließsimulation. Damit lediglich ein Parameter variiert werden muss, ist es sinnvoll einen Kennwert für den Kanal zu ermitteln, der sowohl die Faserpermeabilität als auch den überlagerten Reinharzsbereich berücksichtigt. Nach der Auslegung der Angussstrategie kann aus diesem Parameter die notwendige Kanalgeometrie ermittelt werden. Außerdem dient der Kanalkennwert der Bestimmung der Leistungsfähigkeit.

Das Kapitel 5 behandelt die Auswirkungen des Verfahrens auf verschiedene Laminataufbauten und Fasermaterialien. Hierbei wird durch taktile Dickenvermessung und durch einen visuellen Vergleich von Schliffbildern der Kanalbereich nach der Auflösung des Differenzdrucks und Aushärtung des Harzes analysiert. Durch einen statischen Test und durch das Festlegen eines Toleranzbereichs wird die Signifikanz der Ergebnisse abgesichert.

Praxisbezogene Anwendungen des Verfahrens werden in Kapitel 6 vorgestellt. Hierbei wird auch experimentell untersucht, wie das Verfahren auf Prozessstörgrößen reagiert. Besonders interessant sind hierbei Untersuchungen zum Verhalten mit einer zweiten Vakuumfolie (double bag infusion) und der Einfluss von Infusionshilfsstoffen. Des Weiteren sind die bei komplexen Bauteilen häufig auftretenden und notwendigen Falten in der Vakuumfolie für die Abdichtung der Kanäle von Bedeutung. Außerdem wird das Prozessfenster zur Auflösung des Kanals durch ein mechanisches Analogiemodell ermittelt. In der Abb. 1.1 ist die Gliederung der Arbeit mit den entsprechenden Inhalten grafisch dargestellt.

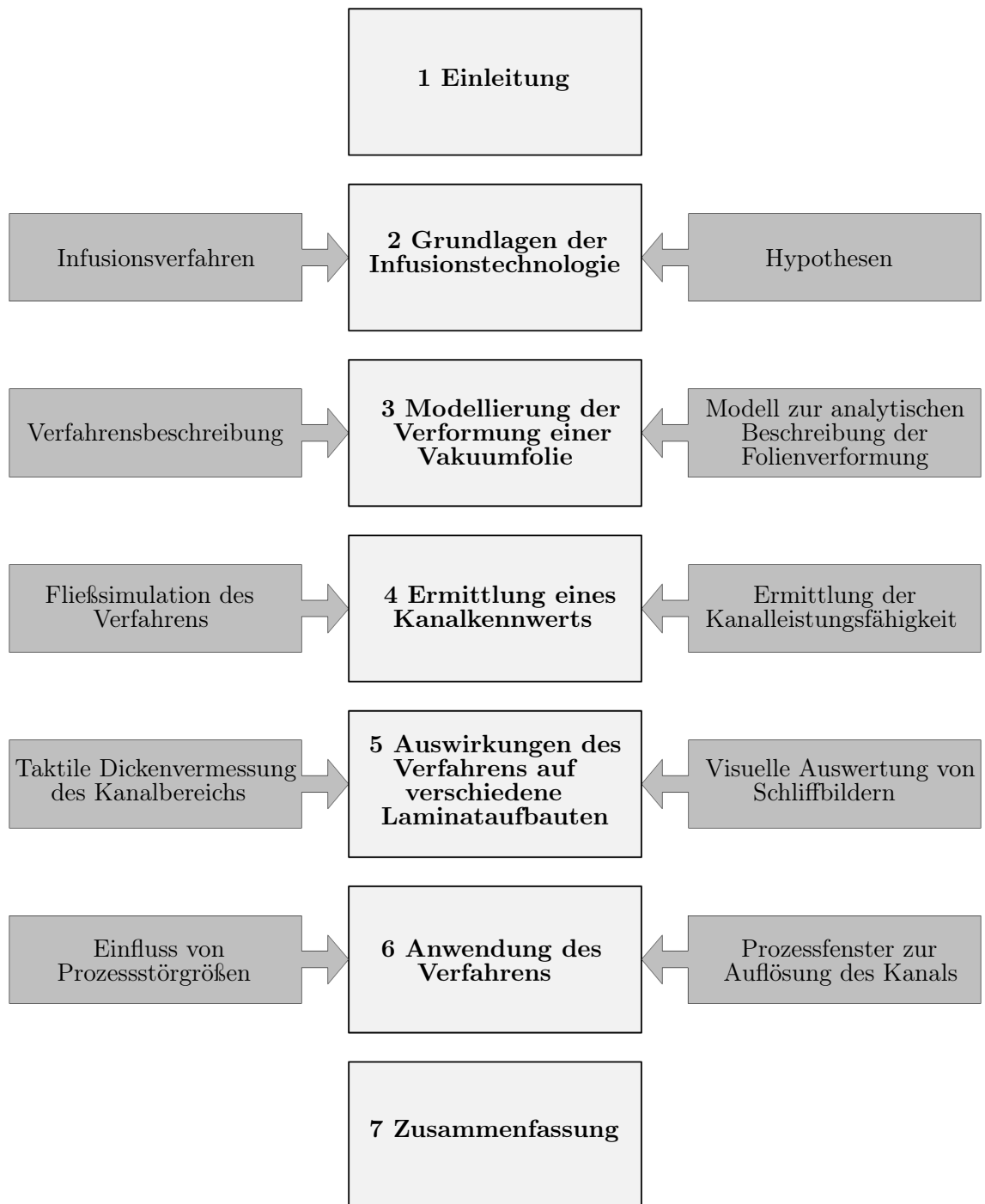


Abb. 1.1: Grafische Darstellung der Gliederung

## 2 Grundlagen der Infusionstechnologie

### 2.1 Infusionsverfahren nach Stand der Technik

Die Infusions- und Injektionsverfahren basieren im Wesentlichen alle auf dem Prinzip, dass zwischen dem Harzvorrat und dem Vakuumaufbau (Kavität) ein Druckunterschied herrscht. Der prinzipielle Unterschied zwischen Infusion und Injektion besteht im Werkzeugaufbau. Beim *Resin Transfer Molding* (RTM) werden starre Formwerkzeughälften verwendet, um dem positiven Injektionsdruck standzuhalten. Hingegen wird bei der Infusion ein Formwerkzeugteil durch eine flexible Folie ersetzt und der Druck in der Kavität ist geringer als der atmosphärische Druck. [26]

Da das Fasermaterial bei den meisten Infusionsverfahren durch eine Vakuumfolie gesiegtelt und die sich bildende Kavität evakuiert wird, ändert sich die Dicke der Preform durch den Druckunterschied. Wird das Harz durch den Umgebungsdruck in die Kavität gepresst, steigt der Druck in der Kavität an. Dieser Druckanstieg hängt von der Fließfront des Harzes ab und bewirkt eine Dekompression des Fasermaterials und somit steigt die Dicke an (Abb. 2.1).

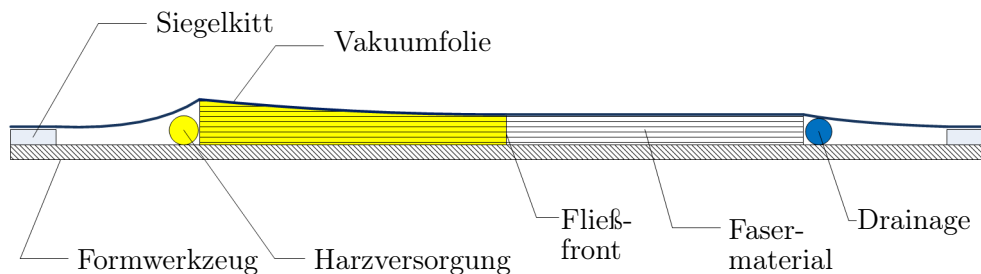


Abb. 2.1: Dickenänderung des Fasermaterials durch Änderung der Druckdifferenz bei der Vakuuminfusion. Der dargestellte Konturverlauf ergibt sich aus der Überlagerung der abnehmenden Komprimierung des Fasermaterials und dem Verlauf des Druckgradienten durch das einströmende Harz (in Anlehnung an [17])

Es gibt einen Unterschied zwischen dem Komprimierungs- und dem Dekomprimierungsverhalten bei trockenen Fasermaterialien. Hierdurch wird eine Hysterese hervorgerufen, sodass die Dicke bei zyklischer Be- und Entlastung immer geringer wird. Dieser Effekt kann mit der zunehmenden Verschachtelung der einzelnen Fasern begründet werden. [17, 28, 68]

Bei imprägnierten Fasermaterialien wird der Reibungskoeffizient verringert und dadurch ändert sich das Komprimierungsverhalten von imprägnierten zu nicht imprägnierten Fasermaterialien. Dies bedeutet, dass für durchtränkte Fasermaterialien ein geringerer Druck notwendig ist, um die gleiche Dicke wie bei trockenen Fasermaterialien zu erzielen.

### 2.1.1 Infusionsverfahren

Bei den bekannten Verfahren *Vacuum Assisted Resin Infusion* (VARI) und *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* Verfahren (VARTM) wird das Fasermaterial auf das vorbereitete Formwerkzeug aufgelegt. Dies kann entweder Lage für Lage oder in vorgeformten Lagenpaketen (Preformen) erfolgen. Dieser Aufbau wird mit einem Abreißgewebe abgedeckt und durch eine Vakuumfolie und Siegelkitt luftdicht verschlossen (vgl. Abb. 2.2). Zum einen wird durch das anschließende Evakuieren des Aufbaus eine Kompression des Fasermaterials ermöglicht und zum anderen wird die Bildung von Poren reduziert. Das Abreißgewebe bewirkt, dass nach der Infusion und dem Aushärten des Harzes die Vakuumfolie und die Harzkanäle wieder vom Bauteil getrennt werden können.[18]

Für eine Kontrolle der Fließfront und Verlängerung der Fließwege können bei diesen Verfahren, in Abhängigkeit des Bauteils, mehrere harzführende Kanäle (Angusskanäle) auf dem Bauteil positioniert werden. Diese Positionierung erfolgt entweder aus Erfahrungswerten oder wird durch eine Fließsimulation abgeschätzt. Hierbei spielen die möglichen Fließwege des Harzes eine Rolle, aber auch das Zusammenfließen von Harzfronten beeinflusst die Verteilung der Kanäle.[41]

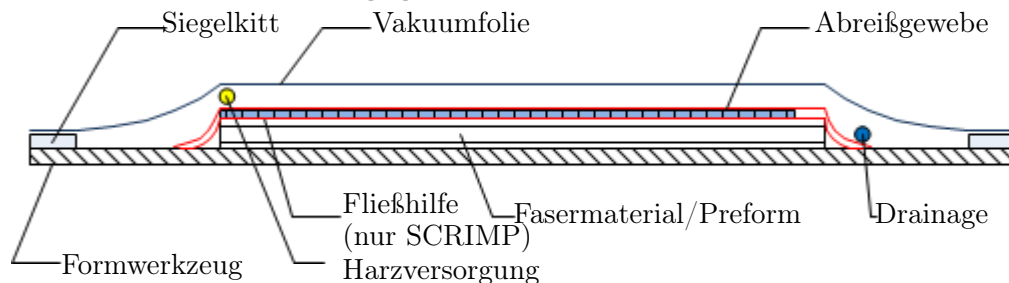


Abb. 2.2: Schematischer Aufbau des VARI/VARTM/SCRIMP Verfahrens

Eine Abwandlung des VARTM Verfahrens stellt das *Seeman's Composite Resin Infusion Molding Process* (SCRIMP) Verfahren dar. Zur schnellen Verteilung des Infusionsharzes wird eine Fließhilfe, wie in Abb. 2.2 dargestellt, benutzt. Dies ist ein Gewebe oder Gewirk, das dem Harz nur einen geringen Fließwiderstand entgegensetzt und somit für eine schnelle und flächige Verteilung des Harzes sorgt, wodurch das trockene Fasermaterial zusätzlich in Dickenrichtung durchtränkt wird. Im Querschnitt betrachtet bildet sich ein Fließkeil aus. Die Dicke der Fließhilfe muss auf die Laminatstärke abgestimmt werden und kann vor allem bei Dickensprüngen Probleme mit nicht vollständig

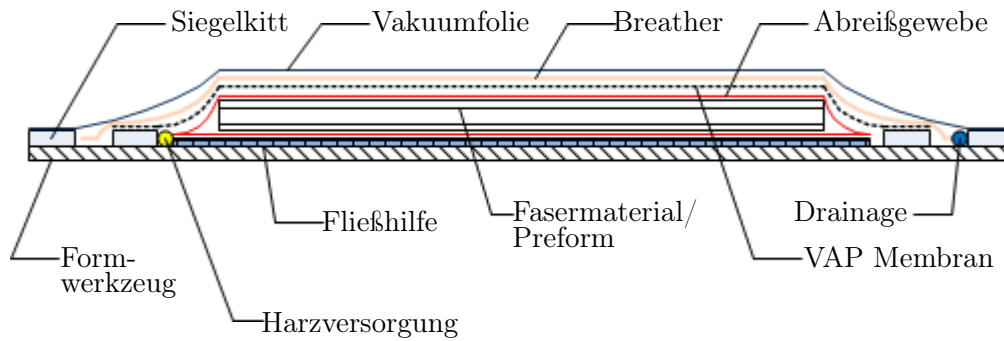


Abb. 2.3: Schematischer Aufbau des VAP Verfahrens (in Anlehnung an [24])

durchtränkten Bereichen bereiten. Begründet werden kann dieses Verhalten mit dem schnelleren Fließen des Harzes in der Fließhilfe, wobei in Bereichen mit besonders hohen Wandstärken das Harz noch nicht abgesackt ist, aber in den dünneren Bereichen bereits das Fasermaterial vollständig durchtränkt ist. Durch die Anordnung der Harzkanäle kann die Fließfront jedoch beeinflusst werden. [35, 54]

Beim **Vacuum Assisted Process** (VAP) wird zur Entlüftung von Gasen und flüchtigen Bestandteilen (Lösemittel) des Harzes eine semipermeable Membran verwendet. Diese Membran ist gasdurchlässig aber undurchlässig für das Harz, wodurch ein geringerer Druck als der atmosphärische Druck über das gesamte Bauteil während der Infusion aufrechterhalten werden kann. Bei anderen Prozessen, wie VARI oder VARTM, werden die Entlüftungsanschlüsse so positioniert, dass die Fließfront des Harzes hier als letztes eintrifft. Beim VAP Verfahren ist dies nicht nötig, da über die gesamte Fläche evakuiert wird. Die Abb. 2.3 zeigt den schematischen Aufbau des VAP Verfahrens. Als unterste Lage wird ein Harzverteilungsmedium auf das Formwerkzeug aufgelegt. Darüber werden Abreißgewebe, das Fasermaterial und die Membran geschichtet. Die Membran wird an den Rändern abgedichtet und mit einem Breather und einer Vakuumpumpe abgedeckt und abgedichtet. Durch den Breather wird eine Drainage zwischen Vakuumpumpe und Membran sichergestellt. Ansonsten würde die Vakuumpumpe einfach durch den Umgebungsdruck auf die Membran gedrückt und eine Evakuierung des Bauteils erschwert. [7, 24]

Das **Vacuum Induced Preform Relaxation** (VIPR) Verfahren stellt auch eine Erweiterung des VARTM Verfahrens dar. Hierbei ermöglicht eine aufsetzbare Vakuumkammer die lokale Beeinflussung der Permeabilität. Die Beeinflussung wird durch den Druck in der Vakuumkammer gesteuert. Ist der Vakuumkammerdruck geringer als der Druck unterhalb der Vakuumpumpe, wird die Permeabilität gesteigert, da die Komprimierung des Fasermaterials verringert wird (Abb. 2.4). [3–5]

Um den Faservolumengehalt und die Dickenverteilung zu verbessern, hat die Boeing Corporation das **Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion** Verfahren im Jahr 2003 patentiert. Hierbei wird zunächst die Preform durch zyklisches Belasten und Entlasten komprimiert. Das sogenannte *Debulking* erfolgt also durch ein abwechselndes Evakuieren und Belüften des Vakuumaufbaus.

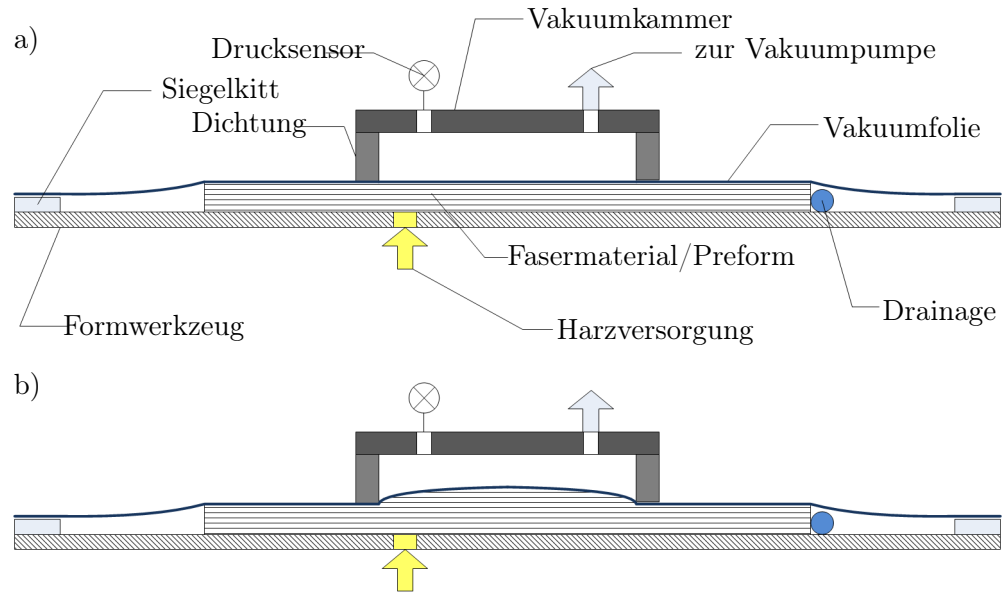


Abb. 2.4: Schematischer Aufbau des VIPR Verfahrens a) Vakuumkammerdruck entspricht Umgebungsdruck b) Vakuumkammerdruck ist geringer als der Druck unterhalb der Vakuumfolie (in Anlehnung an [3])

Im Unterschied zu den übrigen Verfahren wird nicht nur der Vakuumaufbau evakuiert, sondern auch der Harzvorrat (siehe Abb. 2.5). Hierdurch wird die Druckdifferenz zwischen Kavität und Harzvorrat gesenkt und dadurch der Laminatdickengradient verringert. Allerdings kann durch die Senkung der Druckdifferenz die Infusionszeit ansteigen. [48, 66]

Bei der Flügelschalenfertigung der Bombardier C Series wird das **Resin Transfer Infusion** Verfahren (RTI) angewendet. Im Jahr 1998 ist dieses Verfahren als Patent veröffentlicht worden. Durch ein komplexes Zusammenspiel aus versteiften und elastischen Bereichen der Vakuumhaube werden Fließwege, wie in Abb. 2.6 gezeigt, für das Harz geschaffen. Damit der niedrige Faservolumengehalt in diesen harzreichen Bereichen nach der Imprägnierung wieder angehoben werden kann, wird nach vollständiger Infiltration der Umgebungsdruck durch die Nutzung eines Autoklaven erhöht. Die Erhöhung des Umgebungsdrucks führt zu einem Herausdrücken des Harzes aus diesen Bereichen. Somit kann der Faservolumengehalt auf das gewünschte Niveau eingestellt werden. [14]

Zusätzlich zu den erwähnten Infusionsverfahren sind auch Verfahren bekannt, bei denen zwei Vakuumsäcke verwendet werden. Hierzu zählt das **Pulsed Infusion** Verfahren. Auf der ersten Vakuumfolie wird ein Druckverteilungsmedium, aus z.B. Silikon, aufgebracht und mit einer zweiten Vakuumfolie zur Atmosphäre abgedichtet. Der Druckverteiler kann in Abhängigkeit des zu fertigenden Bauteils verschiedene Formen annehmen und bildet örtlich begrenzte Vakuumkammern. Durch das Einstellen eines Druckunterschiedes, wie beim VIPR-Verfahren, kann die erste Folie angehoben werden und dadurch verteilt sich das Harz (Static Pulsed Infusion SPI). Zusätzlich kann der Druckunterschied zwi-



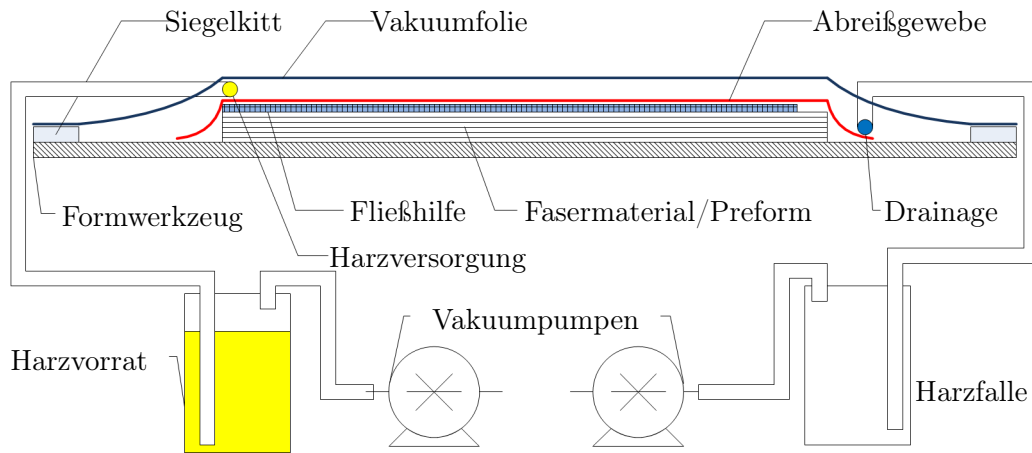


Abb. 2.5: Schematische Darstellung des CAPRI- Verfahrens (in Anlehnung an [48])

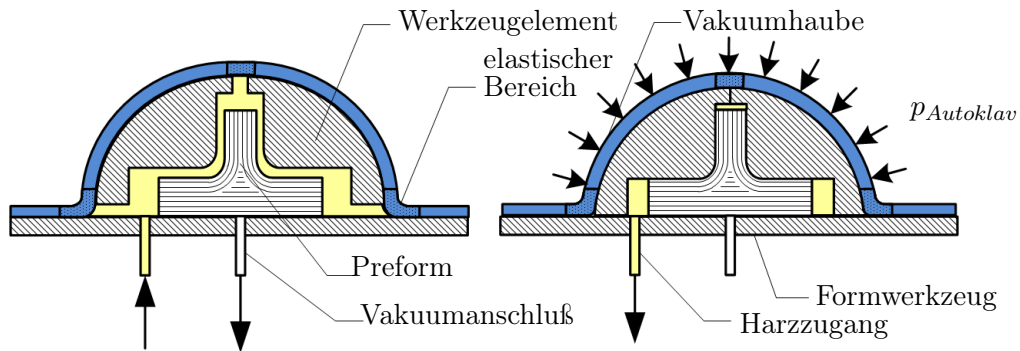


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des RTI Verfahrens (in Anlehnung an [14]). Links: Zustand für die Infusion; Rechts: Autoklavdruck drückt überschüssiges Harz aus der Kavität

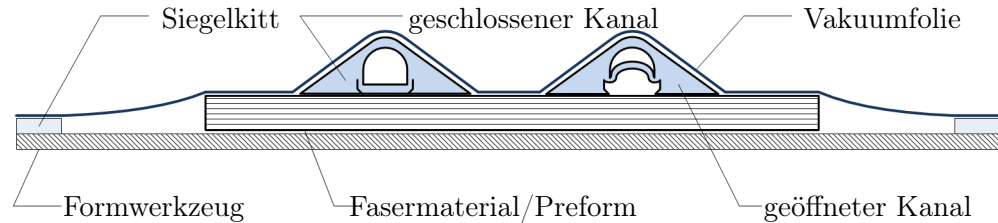


Abb. 2.7: Schematische Darstellung des CARTM Verfahrens mit geschlossenem und geöffnetem Kanal (in Anlehnung an [43])

schen erster und zweiter Vakuumkammer pulsierend gesteuert werden (Dynamic Pulsed Infusion DPI). Hierdurch wird das Fasermaterial auch in Dickenrichtung durchtränkt. [8, 50]

Ein ähnliches Verfahren ist außerdem aus dem im Jahr 2003 patentierten Verfahren **Channel Assisted Resin Transfer Molding** (CARTM) bekannt [43]. Hier wird ebenfalls ein Druckverteiler verwendet. Überdies wird eine Vorgehensweise mit Verteilungskanälen beschrieben. Diese Kanäle sind Hohlprofile, die unterhalb der Vakuumschicht auf der Preform platziert werden. Durch Einstellen eines Differenzdrucks zwischen dem Hohlraum des Kanals und dem Kavitätsdruck können die, aus flexiblem Material bestehenden, Kanäle geöffnet und geschlossen werden (Abb. 2.7).

Des Weiteren können die erwähnten Profile auch in einem beidseitig geschlossenen Werkzeug verwendet werden. Die Hohlprofile werden dazu in eine der beiden Werkzeughälften eingelassen.

Der **Fast Remotely Actuated Channel** (FASTRAC) Prozess nutzt ebenfalls eine Art wiederverwendbare Fließhilfe. Zwischen erstem und zweitem Vakuumsack wird ein austauschbares Werkzeug eingelegt, das integrierte Kanäle besitzt. Vor der Infusion wird der erste Vakuumsack bzw. die Kavität belüftet. Da der zweite Vakuumsack mit dem austauschbarem Werkzeug weiterhin evakuiert wird, legt sich durch die Druckdifferenz die Vakuumschicht des ersten Vakuumsacks in die Kanäle. Anschließend wird für die Infusion der erste Vakuumsack erneut evakuiert und der Harzzugang geöffnet. Am Ende der Infusion wird der zweite Vakuumsack mit dem austauschbaren Werkzeug entfernt und die Kanäle bilden sich zurück. [2]

Das von van Herpt [36] patentierte Verfahren entspricht in seiner Funktionsweise der Vakuumdifferenzdruckinfusion (siehe Kapitel 3.1). Die Kanäle bei der Vakuumdifferenzdruckinfusion werden aber nicht unlösbar mit der Vakuumschicht verbunden. Außerdem muss der Druck in den Kanälen nicht niedriger sein als der Druck innerhalb der Kavität vor der Infusion.

Um größere Bauteile zu infundieren können die Kanäle rauteenförmig angeordnet werden und unterteilen die große Oberfläche in viele einzelne Bereiche. Diese Einzelbereiche sind anschließend einfacher zu imprägnieren als die große Bauteiloberfläche. [37]

### 2.1.2 Beispiel für die Infusion von großen Bauteilen

Die Infusion von Großbauteilen soll am Beispiel eines Windkraftrotorblatts, eines Boots-rumpfes und einer Flügelschale mit Hilfe typischer Infusionsstrategien erläutert werden.

Das in die Rotorblattform abgelegte und trockene Fasermaterial wird auf der gesamten Fläche mit Abreißgewebe abgedeckt und anschließend wird die Fließhilfe aufgelegt. An den Bauteilrändern wird die Fließhilfe etwa fünf Zentimeter zurückgesetzt, damit hier das Harz gebremst wird und im Bereich der Fließhilfe das Harz ausreichend Zeit bekommt, das Fasermaterial in Dickenrichtung zu durchtränken. Im Wurzelbereich eines Rotorblattes treten sehr große Laminatdicken von etwa 100 mm auf, allerdings ist ein Teil des Laminatquerschnitts bereits vorausgehärtet. Damit das noch nicht imprägnierte Fasermaterial in diesem Bereich mit genügend Harz versorgt werden kann, wird teilweise eine zweite Lage der Fließhilfe verwendet. Eine perforierte Trennfolie zwischen Abreißgewebe und Fließhilfe begünstigt das Entfernen der Fließhilfe nach der Aushärtung des Harzsystems.

In Längsrichtung des Rotorblatts werden auf der Fließhilfe Angusskanäle platziert. Hierbei können zum Beispiel zwei Kanäle entlang des Hauptgurts positioniert werden. In der Abb. 2.8 entsprechen die Kanäle 1 und 2 dieser Vorgehensweise. Zusätzlich werden weitere Kanäle in Längsrichtung des Rotorblatts (Kanal 5) verwendet, die jedoch nicht über die gesamte Länge durchgehen und mit eigenen Harzreservoirs verbunden sind. Im Wurzelbereich werden für eine ausreichende Harzversorgung des Fasermaterials zwei weitere Harzkanäle (Kanal 3 und 4) angeordnet. Der gesamte Aufbau wird mit Vakuumfolie versiegelt und evakuiert.

Es wird zunächst nur der Kanal 1 für die Infusion verwendet. Das Harz strömt im Angusskanal bis zur Blattspitze und verteilt sich durch die Fließhilfe in Querrichtung. Erreicht das Harz den Kanal 2 über die gesamte Rotorblattlänge, wird dieser Kanal geöffnet und zusätzliches Harz strömt in den Aufbau. Ähnlich ist die Vorgehensweise bei den übrigen Kanälen. Im Wurzelbereich werden die beiden Kanäle erst geöffnet, wenn das Harz auch über die Laminatdicke im Kanalbereich verteilt ist.

Für einen Bootsrumppf wird eine andere Vorgehensweise für den Vakuumaufbau verwendet. Bei der Infusionsstrategie, wie in Abb. 2.9 gezeigt, werden zusätzlich Angusskanäle in Querrichtung benutzt. Dies bedeutet, dass von einem Hauptversorgungs kanal, der sich am tiefsten Punkt der Form befindet, weitere Kanäle abzweigen.

Im Forschungsprojekt Dry Fibre Placement Wingcover (DFP-WC) hat das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Zusammenarbeit mit dem Composite Technology Center Stade GmbH (CTC) eine Flügelschale im industriellen Maßstab hergestellt. Als Fasermaterial ist das von der Firma Hexcel hergestellte HiTape und als Harz das Zweikomponenten Harzsystem RTM6-2 verwendet worden. Die Infusionsstrategie basiert hierfür im Wesentlichen auf dem VAP Verfahren. Die Harzversorgung der Flügelschale wird über die T-Stringer der Flügelschale sichergestellt. Zur besseren Harzverteilung werden zwischen den Stringern Fließhilfen verwendet. Die VAP Membran, ist

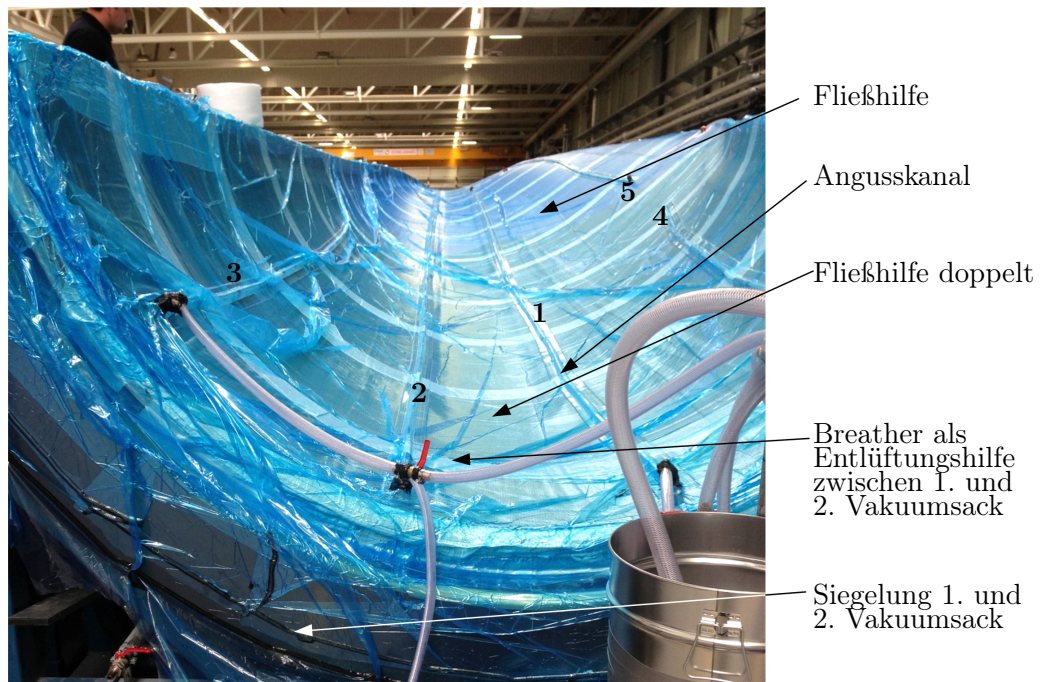


Abb. 2.8: Infusionsaufbau an einer Halbschale eines Windkraftrotorblatts.



Abb. 2.9: Infusion eines Bootsrumpfs [16]

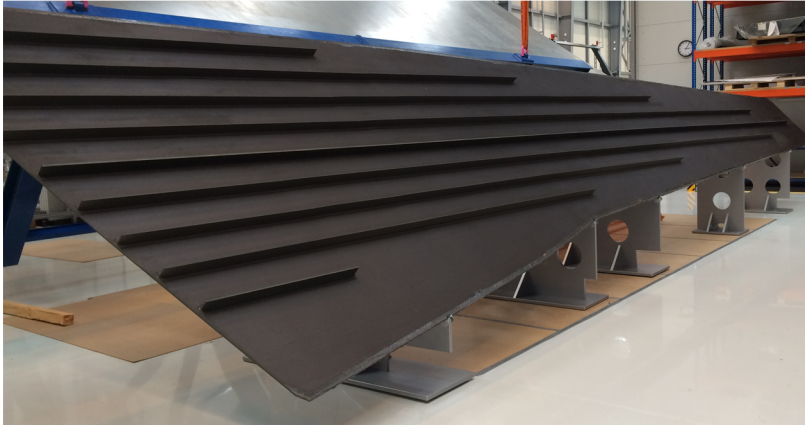


Abb. 2.10: Infiltrierte Flügelchale aus dem Projekt DFP-WC

anders als in der Abb. 2.3 gezeigt, werkzeugseitig abgelegt. Somit liegt die Faserpreform auf der VAP- Membran und wird vom Harz in Dickenrichtung durchtränkt.

## 2.2 Einflussgrößen auf die Infusionseigenschaften

Zum besseren Verständnis von Infusionsprozessen ist es notwendig, die wichtigsten Einflussgrößen zu kennen. Hierzu zählen zum einen Kennwerte des Fasermaterials (Permeabilität) und zum anderen die des Matrixwerkstoffs (Viskosität).

### 2.2.1 Permeabilität

Eine der wichtigsten Kenngrößen der Infusionsverfahren in Hinblick auf die Imprägnierung ist die Permeabilität. Im Allgemeinen wird unter der Permeabilität die Durchlässigkeit von Materialien für z.B. Flüssigkeiten oder Gase verstanden. Im Bereich der Infusionstechnologie kann mit Hilfe dieser Kenngröße das Fließverhalten des Harzes im Fasermaterial bestimmt werden.

Die Permeabilität hängt vom Fasermaterial und von der Matrix ab. Beim Fasermaterial wird die Permeabilität durch

- den Faserwerkstoff
- die Textilarchitektur
- die Schlichte (Einfluss auf die Oberflächenspannung)
- das Garn (Filamentanzahl und Durchmesser)

beeinflusst. Die Oberflächenspannung ist, neben der Viskosität, auch die Einflussgröße der Matrixwerkstoffe. Außerdem haben die Porosität bzw. der Faservolumengehalt und der Kontaktwinkel Einfluss auf die Permeabilität.

Bei einem niedrigen Infusionsdruck haben, anders als bei einem hohen Infusionsdruck, Kapillareffekte zusätzlich einen vermeintlichen Einfluss auf die Permeabilität. Diese Kapillareffekte treten auf, da Hohlräume im Faserbündel und Kanäle zwischen den Faserbündeln vorhanden sind. Da die Hohlräume innerhalb des Faserbündels kleiner sind als die Kanäle, ist der Kapillardruck in den Hohlräumen größer, weshalb das Harz in den Bündeln schneller fließt als in den Kanälen. Wird bei der Bestimmung der Permeabilität der Kapillardruck mit berücksichtigt, kann eine Abhängigkeit der Permeabilität vom Injektionsdruck nicht nachgewiesen werden. [6]

Auch der Faservolumengehalt hat Auswirkungen auf die Permeabilität. Um möglichst hohe Faservolumengehalte erzeugen zu können, wird ein möglichst großer Kompressionsdruck des Fasermaterials nötig. Durch die Kompression werden jedoch die kleinen Kanäle, die die Permeabilität ausmachen, verschlossen und somit die Infusion erschwert. Die Ermittlung der Permeabilität erfolgt im Wesentlichen mit Hilfe der unidirektionalen (1D Permeabilitätsbestimmung) oder mit der radialen Fließmethode (2D Permeabilitätsbestimmung). Bei der unidirektionalen Fließmethode wird das Fasermaterial in einen Metallrahmen eingelegt und auf einer Metallplatte positioniert. Damit die Fließfront jederzeit optisch erkannt werden kann, wird die Oberseite mit einer durchsichtigen Platte (Glas oder PMMA) abgedeckt. Der Injektions- und Umgebungsdruck wird gemessen und damit kann die Permeabilität bestimmt werden.

Aus dem Gesetz von Darcy folgt die Permeabilität  $K$ , wobei die Darcy-Geschwindigkeit  $v_{Darcy}$ , die Viskosität  $\mu$  und der Druckgradient  $\frac{dp}{dx}$  gemessen werden [52]. Nach [9] wird zusätzlich der Einfluss des Faservolumengehalts  $\varphi_F$  mit berücksichtigt.

$$v_{Darcy} = -\frac{K}{\mu(1 - \varphi_F)} \frac{dp}{dx} \quad (2.1)$$

Die Methode kann sowohl als transientes Verfahren, als auch als stationäres Verfahren angewendet werden. Im Unterschied zum transienten Verfahrensablauf ist beim stationären Verfahren das Fasermaterial bereits durchtränkt und die Druckdifferenz muss über zwei Drucksensoren ermittelt werden (Abb. 2.11).

Die radiale Fließmethode verhindert das Auftreten möglicher Randeffekte, wie zum Beispiel das Voreilen an den Rändern bei der unidirektionalen Methode. Bei der zweidimensionalen Permeabilitätsbestimmung wird ein Punktanguss verwendet und die elliptische Ausbreitung der Fließfront bestimmt (Abb. 2.12).



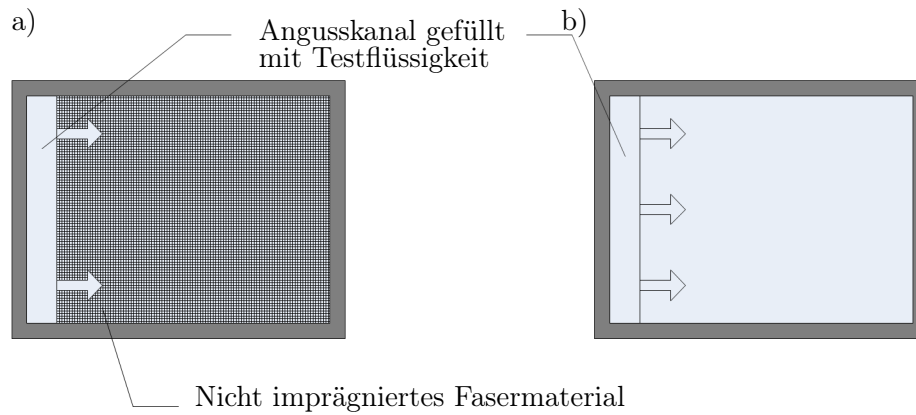


Abb. 2.11: Unidirektionale Fließmethode a) transientes Verfahren b) stationäres Verfahren (in Anlehnung an [47])

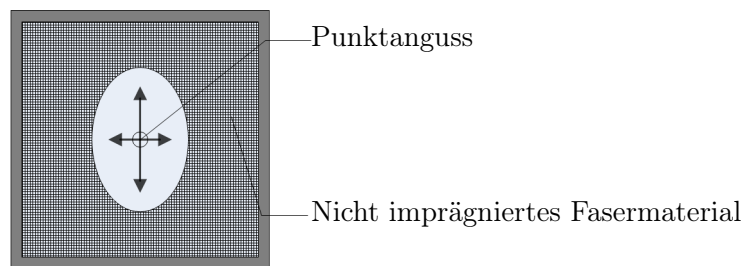


Abb. 2.12: Radiale Fließmethode (in Anlehnung an [42])

Für Infusionsmethoden wie dem SCRIMP Verfahren, bei dem das Fasermaterial primär in Dickenrichtung getränkt wird, oder für sehr dicke Lamine ist die Ermittlung der Permeabilität in Dickenrichtung nötig.

Bei der optischen Ermittlung der Fließfront muss eine durchsichtige Platte verwendet werden. Dies führt bei erhöhtem Druck oftmals zu einer Durchbiegung der Platte und damit zu einer Veränderung der Kavitätshöhe. Daraus resultiert eine unerwünschte Änderung des Faservolumengehalts. Durch die Verwendung von dielektrischen Liniensensoren kann als Abdeckung des Versuchsaufbaus eine biegesteife Metallplatte verwendet werden. [47]

### 2.2.2 Einfluss der Viskosität und der Temperatur

Die Viskosität ist der Kennwert für die Zähigkeit eines Stoffes, der bei Flüssigkeiten von der Temperatur abhängt. Bei der Härungsreaktion von Harzen bilden die Harz- und Härtermoleküle Bindungen. Hierdurch steigt die Viskosität an und Wärme wird freigesetzt. Diese exotherme Reaktion ist auf die chemische Bindungsreaktion zurückzuführen, wodurch gleichzeitig eine Volumenschwindung einsetzt.

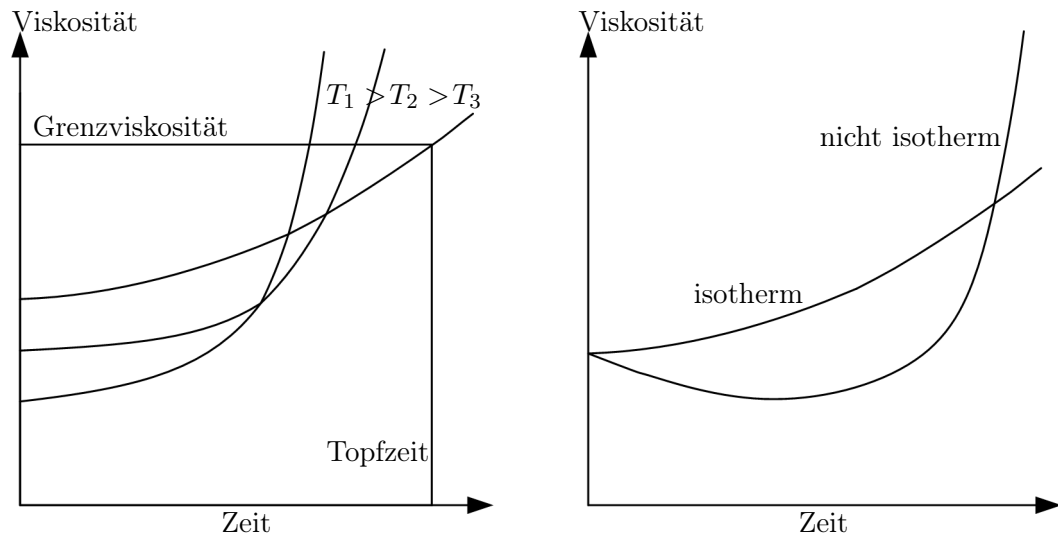


Abb. 2.13: Viskosität in Abhängigkeit der Zeit und Temperatur (in Anlehnung an [23])

Durch Abführen der Wärme wird, wie in Abb. 2.13 gezeigt, ein exponentieller Verlauf der Viskosität über der Zeit erzielt. Dabei gilt, je höher die Temperatur desto steiler steigt die Viskosität an und die Grenzviskosität bzw. die Topfzeit wird schneller erreicht. Geschieht die Wärmeabfuhr nicht, so kann die Viskosität zunächst unter die Anfangsviskosität fallen und danach stark ansteigen.

## 2.3 Laminatqualität

Zwei wesentliche Aspekte zur Charakterisierung der Laminatqualität sind die Porenanzahl bzw. -größe und der Faservolumengehalt eines Laminats. Daher ist es essenziell, die Entstehung von Poren und die Bestimmung des Faservolumengehalts für die Qualitätssicherung zu kennen.

### 2.3.1 Faservolumengehaltsbestimmung

Für die Qualitätskontrolle eines Faserverbundbauteils ist der Faservolumengehalt der am bedeutungsvollsten zu ermittelnde Kennwert. Hierdurch wird die benötigte Fasermenge im Laminat sichergestellt. Die Eigenschaften eines Laminats, wie Steifigkeit, Festigkeit, thermische Ausdehnung, Feuchteaufnahme und Langzeitverhalten, sind vom Faservolumengehalt abhängig. Als Standard hat sich ein Faservolumenanteil von 60 % etabliert. Übersteigt der Faservolumenanteil diesen Wert, liegen die Fasern zu dicht und können nicht mehr vollständig von der Matrix benetzt werden. Der Faservolumengehalt ist stark vom Herstellungsverfahren abhängig.



Zur Bestimmung des Faservolumengehalts existieren verschiedene Verfahren. Es ist zum Beispiel möglich, die Massendifferenz zwischen noch nicht imprägniertem und imprägniertem Faserhalbzeug durch Wiegen zu bestimmen. Ist das Flächengewicht eines Faserhalbzeugs bekannt, kann der relative Faservolumengehalt auch aus der Dicke des ausgehärteten Laminats ermittelt werden. Nach Schürmann [53] gilt für den Faservolumengehalt

$$\varphi_F = \frac{\sum \bar{q}}{\rho_F \bar{t}} \quad (2.2)$$

Hierbei stellt  $\bar{q}$  das Flächengewicht der einzelnen trockenen Faserhalbzeuge,  $\rho_F$  die Dichte der Faser und  $\bar{t}$  die gemittelte Laminatdicke dar.

Des Weiteren kann die Faser thermisch von der Matrix getrennt werden. Besonders bei glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) kann die Matrix in einem Muffelofen verkocht werden. Durch Ermittlung des Gewichts vor und nach der Verkokung können der Massenanteil und damit der Faservolumengehalt bestimmt werden. Bei aramidfaserverstärkten Kunststoffen (AFK) kann dieses Verfahren nicht angewendet werden, da die Faser selbst einem Massenverlust unterliegt. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe können auch verkocht werden, jedoch gelingt dies nur bei niedrigen Glühtemperaturen und kurzen Glühzeiten. Hilfreich ist auch ein großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen.

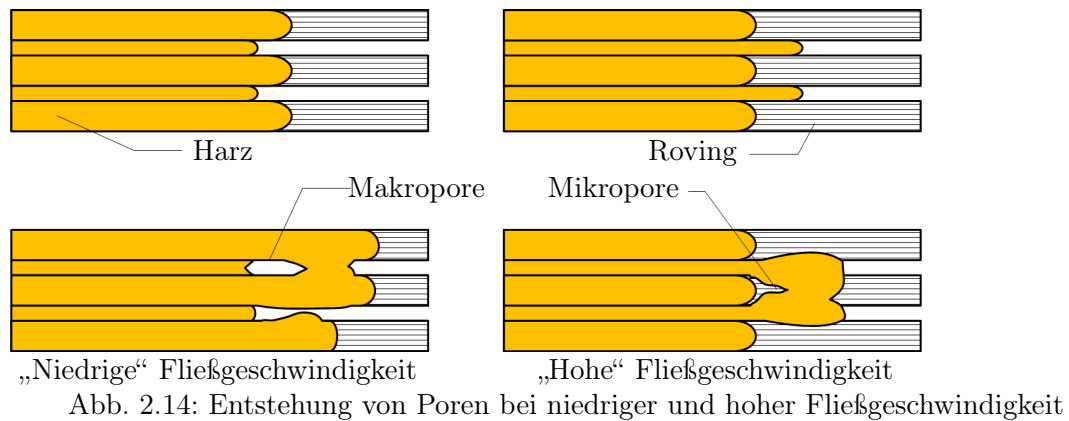
Die chemische Extraktion durch Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid wird bei CFK Laminaten zur Bestimmung des Faservolumengehalts angewendet. Bei AFK Werkstoffen wird hingegen Salpetersäure verwendet. Durch Wiegen vor und nach der Behandlung ist die Ermittlung des Faservolumengehalts möglich.

Bei allen Verfahren werden Mittelwerte des Faservolumengehalts bestimmt. Die Werte können über die Bauteil- bzw. Probengröße stark variieren und so die Festigkeit beeinflussen. Daher sollten zusätzlich lokale Faservolumengehalte durch Schliffproben und Ausplanimetrieren bestimmt werden. [21, 53]

### 2.3.2 Entstehung von Poren

Bei der Imprägnierung von trockenem Fasermaterial mit flüssigem Harz können Poren bzw. Luft- und Gaseinschlüsse entstehen. Hierbei können Mikro- und Makroporen unterschieden werden. Als Mikroporen sind Poren definiert, die zwischen den Filamenten eines Rovings entstehen. Makroporen hingegen entstehen zwischen den einzelnen Rovings eines Faserhalbzeugs.

Die Fließgeschwindigkeit des Harzes hat den größten Einfluss auf die Entstehung der jeweiligen Porenart. Besitzt das Harz eine hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit, so entstehen Mikroporen (siehe Abb. 2.14). Das Harz umspült hierbei die Rovings, da die Lücken zwischen den Rovings dem Harz einen geringen Fließwiderstand entgegensetzen. Bei einer niedrigen Fließgeschwindigkeit des Harzes bilden sich hingegen die Makroporen. Dies



kann mit dem Kapillardruck erklärt werden, wodurch sich das Harz in den Rovings schneller bewegt als in den Lücken. [51, 58]

### 2.4 Zusammenfassung und Ableitung wissenschaftlicher Fragestellungen

Die in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Infusionsverfahren und -methoden geben einen Überblick über die Fülle der Imprägnierungsverfahren. Für eine bessere Übersichtlichkeit lassen sich die Verfahren in unterschiedliche Kategorien einordnen. Zunächst können die Verfahren nach der Art und Weise der Harzverteilung unterschieden werden. Wird zum Beispiel das Harz primär durch einen oder mehrere Kanäle verteilt, so wird das Verfahren einem linearen Angussprinzip zugeordnet. Verfahren, bei denen zum Beispiel Fließhilfe verwendet wird, gehören der Kategorie flächiger Anguss an. Des Weiteren können die Verfahren nach der Position der Harzverteilungshilfsmittel eingeteilt werden. Verfahren, bei denen die Hilfsmittel außerhalb der Kavität positioniert sind, gehören folglich dieser Kategorie an. Analog hierzu werden Verfahren mit Hilfsmitteln innerhalb der Kavität behandelt. Zusammenfassend sind die einzelnen Verfahren in der Abb. 2.15 aufgeführt.

Die Infusionsverfahren, die in die Kategorie flächiger Anguss innerhalb der Kavität eingeordnet sind, haben den Nachteil des zusätzlichen Harzverbrauchs. Dies wird durch die Fließhilfe verursacht, die bis zu 700g Harz pro Quadratmeter aufnehmen kann. Da die Fließhilfe aber eingesetzt wird, um unter anderem Fließwege zu vergrößern, müssten bei den Verfahren der Kategorie linearer Anguss mehrere Angusskanäle verwendet werden. Gleichzeitig steigt hierdurch auch wieder der Harzverbrauch und die Angusskanäle hinterlassen Abdrücke auf der Bauteiloberfläche, wie in Abb. 2.16 am Beispiel eines Windkraftrotorblatts gezeigt. Zusätzlich ist die exotherme Reaktion der Harzsysteme zu beachten, wodurch die zum Teil großen Harzansammlungen in den Kanalbereichen zu hohen Temperaturen führen können. Hierdurch müssen entsprechende Materialien, wie zum Beispiel Polyamid oder Silikon, für die Angusskanäle verwendet werden.

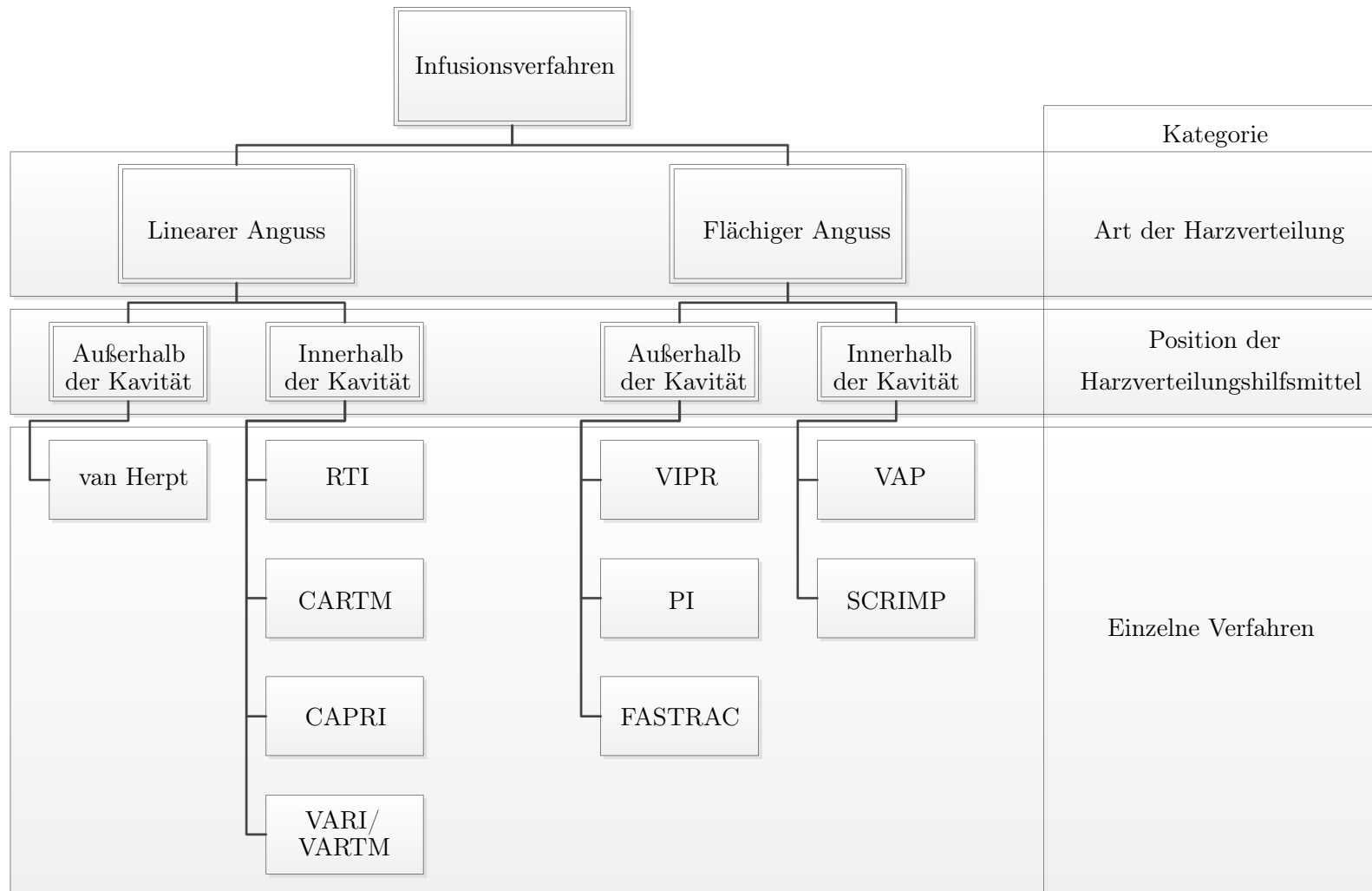


Abb. 2.15: Kategorisierung der einzelnen Infusionsverfahren nach der Art der Harzverteilung und nach der Positionierung der Harzverteilungshilfsmittel (innerhalb oder außerhalb der Kavität).

Ein weiteres Problem bei der Infusion mit Fließhilfe stellt die Abb. 2.17 dar. Bei einem Dickensprung des Fasermaterials ändert sich der Fließkeil über die Bauteildicke. Das Harz fließt in der Fließhilfe schneller als im Fasermaterial und durchtränkt die Preform zusätzlich in Dickenrichtung (schwarze Pfeile). Am Ende des Dickensprungs besteht die Möglichkeit, dass das Harz aus der Fließhilfe die Preform bereits in Dickenrichtung durchtränkt hat und die Fließfront an der Formwerkzeugseite noch nicht an dieser Stelle eingetroffen ist. Hierdurch besteht die Gefahr einer Fehlstelle in diesem Bereich.

Das Infundieren gestreckter Bauteile, wie z.B. ein Windkraftrotorblatt, setzt auch entsprechend lange Angusskanäle voraus. Die Abb. 2.18 zeigt den schematischen Infusionsaufbau eines gestreckten Bauteils im **SCRIMP** bzw. **VARTM/VARI** Verfahren. Bei der Infusion wird zunächst der Angusskanal 1 geöffnet. Das Harz strömt aufgrund des geringen Fließwiderstands entlang des Kanals und verteilt sich zusätzlich in Breitenrichtung. Da der Angusskanal sehr lang ist, bildet sich eine V-förmige Fließfront entlang des Kanals aus. Sobald das Harz im vorderen Bereich den Angusskanal 2 erreicht füllt, sich dieser, da der Kanal eine Kavität darstellt. Der niedrige Fließwiderstand innerhalb des Kanals sorgt für eine Strömung des Harzes in Kanalrichtung. Dieses Voreilen innerhalb des Kanals führt zu einem unkontrollierten Zusammenfließen von Fließfronten und die Gefahr einer Fehlstelle, in der Form eines trockenen Bereichs steigt. Bei der Vakuumdifferenzdruckinfusion tritt dieses Problem nicht auf, da der Kanal erst aktiviert wird, wenn er das Harz verteilen soll.

Alle Verfahren, die innerhalb der Kavität angewendet werden, besitzen den Nachteil der Harzkontamination. Für eine Wiederverwendung von Fertigungshilfsmitteln sind diese Verfahren daher ungeeignet.

Bei den Verfahren der Kategorie flächiger Anguss mit außerhalb der Kavität angeordneten Harzverteilungshilfsmitteln sind die Hilfsmittel bei größeren Bauteilen schwierig zu handhaben. Außerdem wird der zweite Vakuumsack entweder nach der Infusion entfernt oder belüftet. Hierdurch steigt die Gefahr der möglichen Fehlstellen durch Leckagen stark an, da der zweite Vakuumsack seine Bedeutung als Sicherheitsvorkehrung verliert.

Das von van Herpt patentierte Verfahren geht von Kanälen aus, die unlösbar mit der Vakuumhaube verbunden sind. Das Potenzial dieses Verfahrens kann aber durch lösbare Verbindungen wesentlich vergrößert werden. Bei Anwendung von lösbaren und freipositionierbaren Kanälen können zum Beispiel bei Prototypenbauteilen trockene Stellen vermieden werden. Hierfür können die Kanäle während der Infusion entsprechend ausgerichtet werden und das Harz wird in die betreffende Richtung umgeleitet.

Eine Möglichkeit, um die harzverbrauchende Fließhilfe bei der Infusion zu ersetzen, ist es, Angusskanäle auf der Bauteiloberfläche anzuordnen. Ansonsten wird die mögliche Bauteilgröße stark reduziert, da nach [42] der maximale Fließweg bei ca. 2m liegt. Da die Harzverteilungskanäle aber nicht mehr im sonst üblichen Besäumungsbereich liegen, dürfen die Kanäle keine unerwünschten Faserondulationen und Faservolumengehaltsschwankungen hervorrufen. Damit das Harz rechtzeitig aus dem Kanalbereich abgeführt werden kann, muss auch ein Prozessfenster bekannt sein.

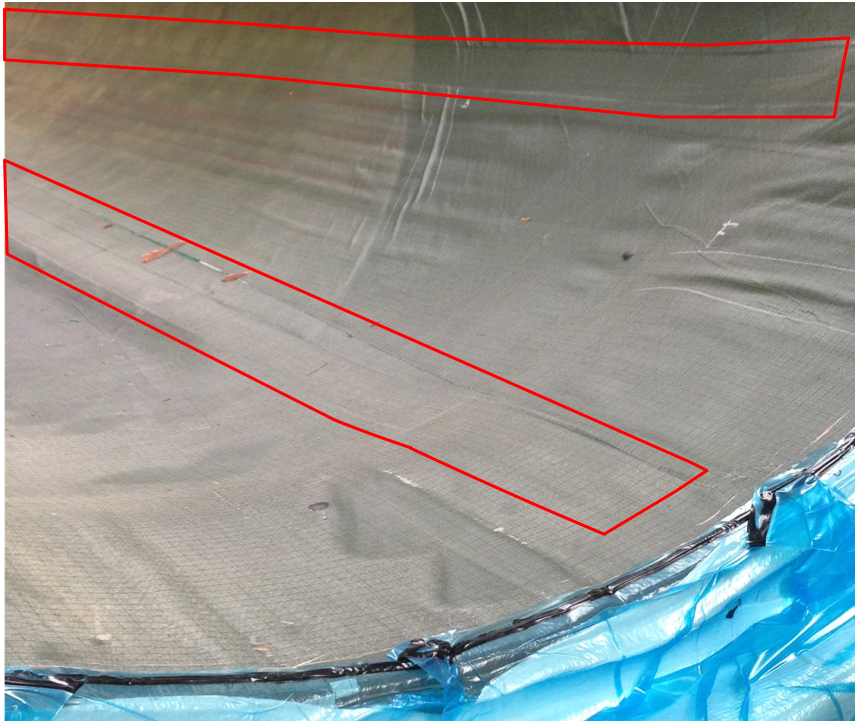


Abb. 2.16: Abdruck von Angusskanälen auf einer Rotorblatthalbschale (rote Markierung)

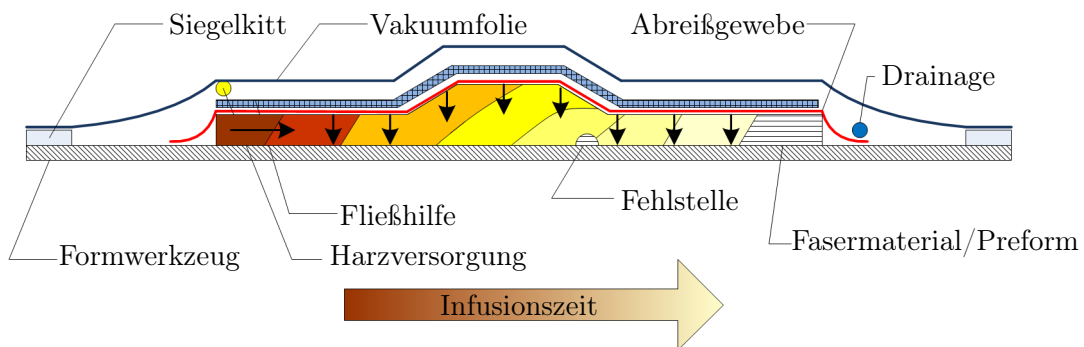


Abb. 2.17: Schematische Darstellung der Infusion eines Dickensprungs mit Fließhilfe

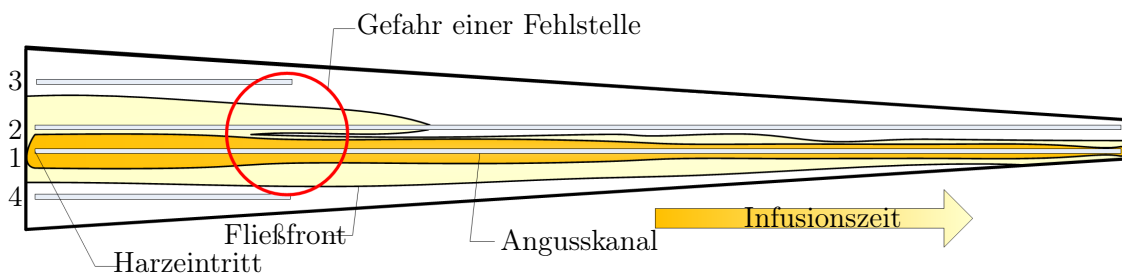


Abb. 2.18: Schematische Darstellung der Infusion eines langen Bauteils

Damit diese zwar schon patentierte Idee für einen zukünftigen industriellen Einsatz anwendbar wird und somit Fertigungsabfälle minimiert werden können, sollen in der vorliegenden Arbeit zunächst die folgenden grundlegenden Fragestellungen geklärt werden.

1. Wie kann eine Kanalgeometrie gestaltet werden, um konventionelle Vakuumfolien im elastischen Bereich zu verformen?
2. Können Abdrücke durch Angusskanäle auf der Bauteiloberfläche bei langfaserverstärkten Faserverbundbauteilen vermieden werden?
3. Besitzt die Kanalgeometrie einen strömungsmechanischen Nachteil und kann dieser Nachteil durch die Steigerung der Permeabilität im Kanalbereich aufgehoben werden?
4. Wie kann ein Prozessfenster vorgegeben werden, in dem das überschüssige Harz aus dem Kanalbereich abgeführt wird?

Aus diesen Fragestellungen können eine Haupthypothese und drei Arbeitshypothesen abgeleitet werden. Für die erste Fragestellung wird keine Hypothese aufgestellt, da sich die Beantwortung aus einer Anpassung bereits bestehender Grundgleichungen ergibt.

**Haupthypothese** Durch die Verwendung von wiederverwendbaren und temporär aktivierbaren Harzverteilungskanälen können harzverbrauchende Infusionshilfsstoffe, wie Fließhilfen, ersetzt werden, ohne im Laminat unzulässige Schädigungen, wie Faserondulationen und Harzansammlungen, zu verursachen.

**Arbeitshypothese I** Wenn die für die elastische Foliendeformation notwendige Kanalgeometrie zur Verteilung des Harzes genutzt wird, kann die im Kanalbereich auftretende höhere Faserpermeabilität den strömungsmechanischen Verlust ausgleichen.

**Arbeitshypothese II** Wenn die Harzverteilungskanäle innerhalb eines Prozessfensters, das durch Faserpermeabilität und Harzviskosität dominiert wird, durch Auflösen des Differenzdrucks deaktiviert werden, hinterlassen die Kanäle keine Abdrücke auf dem Laminat.

**Arbeitshypothese III** Es gibt ein maximales Prozessfenster, d.h. einen Zeitraum in Abhängigkeit von Harzviskosität und Faserpermeabilität, in dem die Kanäle rückstandsfrei aufgelöst werden können.

In den folgenden Kapitel werden die aufgestellten Hypothesen behandelt. In Kapitel 4 wird mit Hilfe einer Fließsimulationssoftware die Arbeitshypothese I untersucht. Durch die Herstellung und Vermessung von Probekörpern wird die Arbeitshypothese II in Kapitel 5 analysiert. Die Verwendung eines Ersatzmodells aus der Fluidmechanik wird zur Überprüfung der Arbeitshypothese III in Kapitel 6 herangezogen. Abschließend werden in Kapitel 7 die drei Arbeitshypothesen zur Haupthypothese zusammengefasst.

## 3 Modellierung der Verformung einer Vakuumfolie

### 3.1 Prinzipielle Verfahrensbeschreibung

Bei konventionellen Infusionsverfahren werden Anguss- bzw. Harzverteilungskanäle verwendet, die sich innerhalb einer Kavität befinden. Die Kavität wird bei diesen Verfahren aus einer Vakuumfolie und einem starren Formwerkzeug gebildet. Die Vakuumdifferenzdruckinfusion nutzt hingegen Harzverteilungskanäle, die außerhalb einer Kavität positioniert werden und durch einen Differenzdruck zwischen Kavität und Kanal temporär aktiviert werden können. Durch einen geringeren Druck im Kanal als in der Kavität wird die Vakuumfolie im Kanalbereich verformt. Der geringere Druck vergrößert im Kanalbereich die Permeabilität des Fasermaterials und sorgt in Abhängigkeit der Kanalgeometrie für einen zusätzlich überlagerten Reinharzkanal. Dieser Verfahrensansatz ist, allerdings ohne die Nutzung eines überlagerten Reinharzkanals, von van Herpt [36] und die Verfahrenserweiterung durch das DLR [37] patentiert worden.

In der Abb. 3.1 ist der Verfahrensablauf schematisch dargestellt. Vor der Infusion entspricht der Druck im Verteilungskanal  $p_{VK}$  dem Atmosphärendruck  $p_0$  und beide Drücke sind größer als der Druck in der Kavität  $p_K$ . Beim Öffnen der Harzversorgung strömt das Harz in die Kavität und damit ändert sich hier der Druck lokal auf den Druck des Harzes  $p_R$ . Der Druck im Verteilungskanal wird auf einen niedrigeren Druck als der Harzdruck angepasst und die Differenz aus  $p_R$  und  $p_{VK}$  führt zur Verformung der Vakuumfolie. Am Ende der Infusion wird der Kanal auf Atmosphärendruck bedruckt und die Folie relaxiert in den Zustand vor der Infusion zurück. Vorteile dieses Verfahrensansatzes sind:

- nahezu rückstandsfreie Auflösung des Kanals (kaum Abdrücke auf der Bauteiloberfläche)
- Nutzung der Kanäle direkt auf der Bauteiloberfläche
- Reduzierung des Harzverbrauchs
- Zugänglichkeit zu den Kanälen auch während der Infusion
- Kanäle können zur Unterstützung von klassischen Infusionsverfahren genutzt werden, ohne die ursprüngliche Infusionsstrategie zu beeinflussen
- Wiederverwendbarkeit der Harzverteilungskanäle

### 3 Modellierung der Verformung einer Vakuumfolie

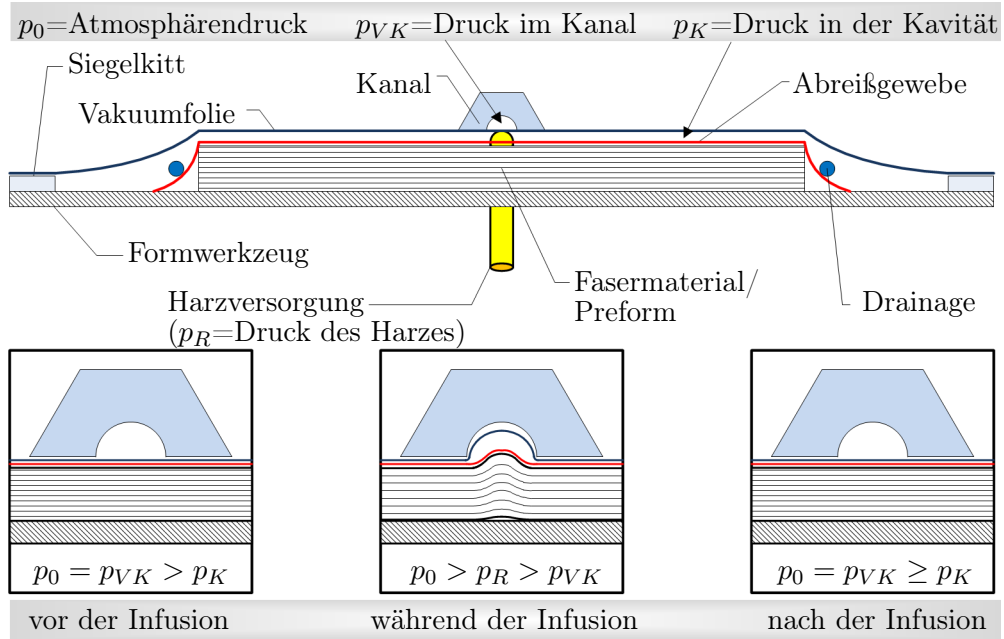


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Verfahrensablaufs bei der Vakuumdifferenzdruckinfusion

#### Betrachtung der Druckverhältnisse

Ergänzend zu der grundlegenden Kurzbeschreibung in Abb. 3.1 ist in der Abb. 3.2 der Druckverlauf des Differenzdrucks  $\hat{p}_i$ , der aus der Differenz zwischen dem Druck in der Kavität  $p_K$  und dem Umgebungsdruck  $p_0$  gebildet wird, für die einzelnen Prozessschritte dargestellt.

$$\hat{p}_i = p_K - p_0 \quad (\text{für } i = a, b, c, d \text{ vgl. Abb. 3.2}) \quad (3.1)$$

Da der Umgebungsdruck  $p_0$  im Kanalbereich dem Druck im aufgesetzten Kanal  $p_{VK}$  entspricht, bedeutet dies für den Kanalbereich:

$$\hat{p} = p_K - p_{VK} \quad (3.2)$$

Der Bildteil 3.2a zeigt, dass der Differenzdruck  $\hat{p}$  vor dem Evakuieren der Kavität Null ist. Wird die Kavität evakuiert (3.2b), sinkt der Differenzdruck aufgrund der Definition in Gleichung 3.1 auf einen negativen Wert (wenn  $p_0 > p_{VK} > p_K$ ) ab.

In 3.2c wird zusätzlich der Kanal außerhalb der Kavität evakuiert und damit steigt der Differenzdruck im Kanalbereich an. Außerdem teilt sich der Umgebungsdruck  $p_0$



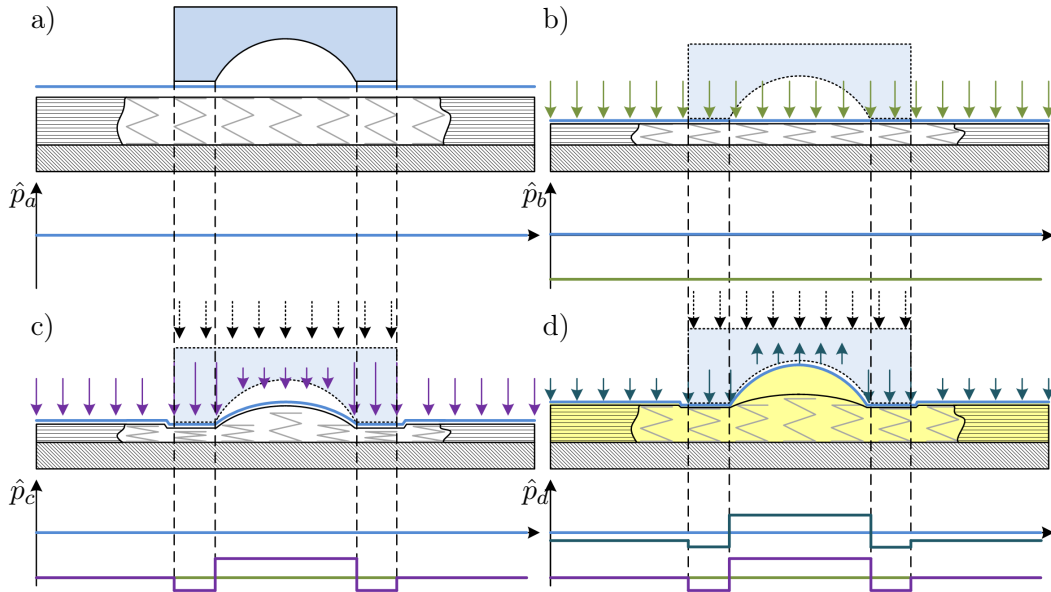


Abb. 3.2: Schematische Darstellung des Differenzdrucks. a) Ausgangszustand ohne Differenzdruck ( $\hat{p}_a = 0$ ), b) Evakuierung der Kavität ( $\hat{p}_b < 0$ ), c) Evakuierung des Kanals ( $\hat{p}_c > \hat{p}_b$ ), d) Während der Infusion ( $\hat{p}_d > \hat{p}_c > 0$ )

(schwarze Pfeile), der sich auf die gesamte äußere Kanalfläche verteilt, auf die kleineren Stützflächen des Kanals auf. Somit steigt die Last in diesem Bereich an und führt zu einer stärkeren Komprimierung des Fasermaterials. Dieses Verhalten wird durch die Federn dargestellt. [19]

Die stärkere Komprimierung des Fasermaterials an den Kanalrändern wirkt, durch die niedrigere Permeabilität im Vergleich zum restlichen Fasermaterial, als eine Art Barriere für das Harz. Somit fließt, wie auch in Abb. 3.5 zu erkennen, das Harz zunächst bevorzugt in Kanalrichtung. Anschließend verteilt sich das Harz quer zur Kanalrichtung. Zusätzlich wölbt sich das Fasermaterial im Kanalbereich auf, da die Komprimierung des Fasermaterials durch den geringeren Umgebungsdruck in diesem Bereich abnimmt. Durch dieses Verhalten wird der Harzfluss entlang des Kanals begünstigt, da durch die geringere Komprimierung der Faservolumengehalt sinkt und damit die Permeabilität ansteigt.

Sobald das Harz in die Kavität einströmt 3.2d wird der Differenzdruck so groß, dass sich die Folie vom Fasermaterial löst und einen überlagerten Reinharzbereich schafft. Für die Infiltration des Harzes muss der Druck im Kanal nicht unterhalb des Kavitätsdrucks liegen. Die Folie wird durch den Druck des Harzes beim Einströmen in die Kavität verformt. Daher muss der Druck innerhalb des Kanals lediglich geringer sein als der Druck des Harzes. Bei typischen Infusionen liegt der Harzdruck unterhalb des Atmosphärendrucks und durch den Differenzdruck zwischen Harzvorrat und Kavität kann der Faservolumengehalt gezielt eingestellt werden.

### 3 Modellierung der Verformung einer Vakuumfolie

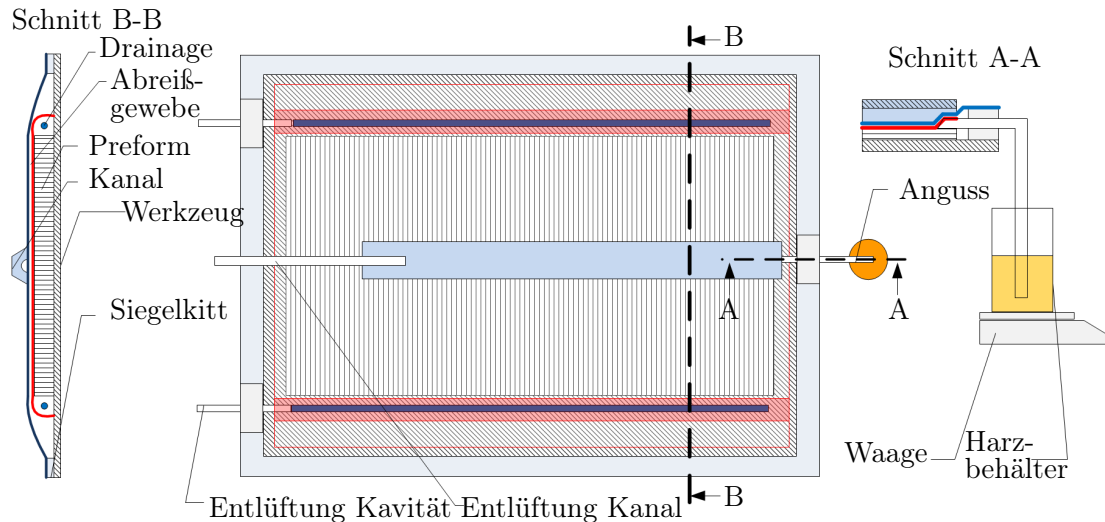


Abb. 3.3: Schematischer Versuchsaufbau für die Untersuchung der Druckvariation

Die Wirkungsweise aus dem Zusammenspiel zwischen Harzdruck  $p_R$  und dem Druck im Kanal  $p_{VK}$  kann an einem einfachen Versuchsaufbau demonstriert werden. Dazu wird ein Vakuumaufbau, wie in Abb. 3.3 gezeigt, gewählt. Der Harzvorratstopf wird auf einer Waage platziert. Vor der Öffnung des Harzzugangs wird der Kanal auf einen Druck  $p_{VK} = 800\text{mbar}$  evakuiert. Kurz nach der Öffnung des Harzzugangs füllt das Harz zunächst die Angussleitung. Wie in Abb. 3.4 gezeigt, führt das Füllen der Angussleitung für kurze Zeit zu einem hohen Massenstrom.

Nach etwa 3 Minuten wird der Druck im Kanal auf ca.  $p_{VK} = 600\text{mbar}$  abgesenkt. Dies führt erneut zu einem Anstieg des Massenstroms, da sich der Kanal weiter öffnet und damit die Querschnittsfläche vergrößert wird. Bei der weiteren Reduzierung des Drucks im Kanal können weitere kurzzeitige Spitzenwerte festgestellt werden. Allerdings klingen diese Werte sehr schnell wieder ab, da das Fasermaterial, in diesem Fall das Harz, nicht mehr schnell genug abführen kann.

Zwar dienen die Kanäle unter anderem zur Vermeidung von Hilfsstoffen, wie zum Beispiel Fließhilfe, aber es ist auch möglich, die Kanäle mit Fließhilfe zu kombinieren. Der Vorteil liegt hierbei in einer Verkürzung der Infiltrationszeit. Dies zeigen Versuche mit einer Kanallänge von etwa 3m. In der Abb. 3.5 sind drei verschiedene Versuchsaufbauten mit qualitativen Fließfrontverläufen nebeneinander abgebildet. Links versorgt nur der Kanal das Fasermaterial mit Harz. In der Mitte ist ein Versuchsaufbau mit der Kombination von Kanal und Fließhilfe gezeigt und im rechten Bildteil sorgt nur die Fließhilfe für die Harzverteilung. Wie bereits beschrieben, fließt das Harz beim ersten Versuch zunächst nur entlang des Kanals. Wohingegen im zweiten Versuch das Harz nicht nur entlang des Kanals strömt, sondern auch direkt in die Querrichtung über die Fließhilfe verteilt wird. Dies liegt zum einen an der hohen Permeabilität der Fließhilfe und zum anderen wird der Effekt der Komprimierung des Fasermaterials an den Kanalfüßen durch die Fließhilfe abgeschwächt. Der Vorteil der Kanal und Fließhilfen- Kombination liegt aber in einer etwa

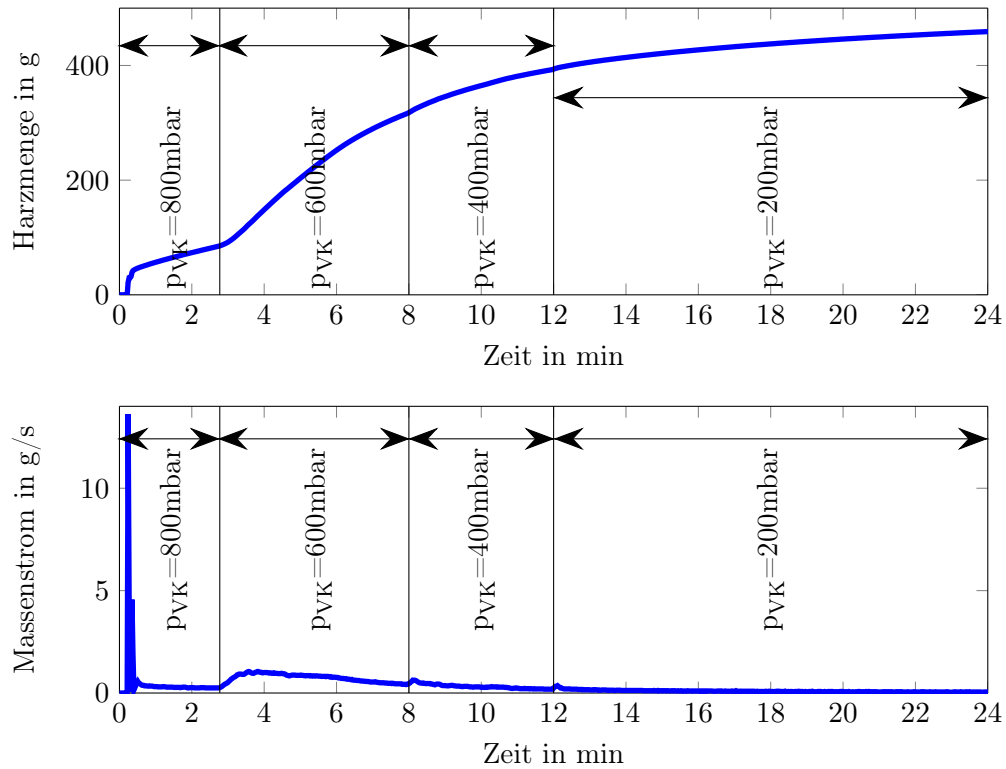


Abb. 3.4: Gemessene Harzmenge (oben) und daraus ermittelter Massenstrom (unten) bei der Variation des Drucks im Kanal. ( $p_{VK}$  ist als Absolutdruck angegeben)

### 3 Modellierung der Verformung einer Vakuumfolie

4 mal schnelleren Harzverteilung gegenüber der Methode ohne Kanal. Um den Effekt der Faserkomprimierung an den Kanalrändern auch für die Fließhilfe zu nutzen und somit ein Füllen des Kanals zu erzwingen, müsste die Fließhilfe komprimierbar sein. 3D Textilien, die sich lokal durch einen Druck komprimieren lassen, könnten hierfür Anwendung finden.

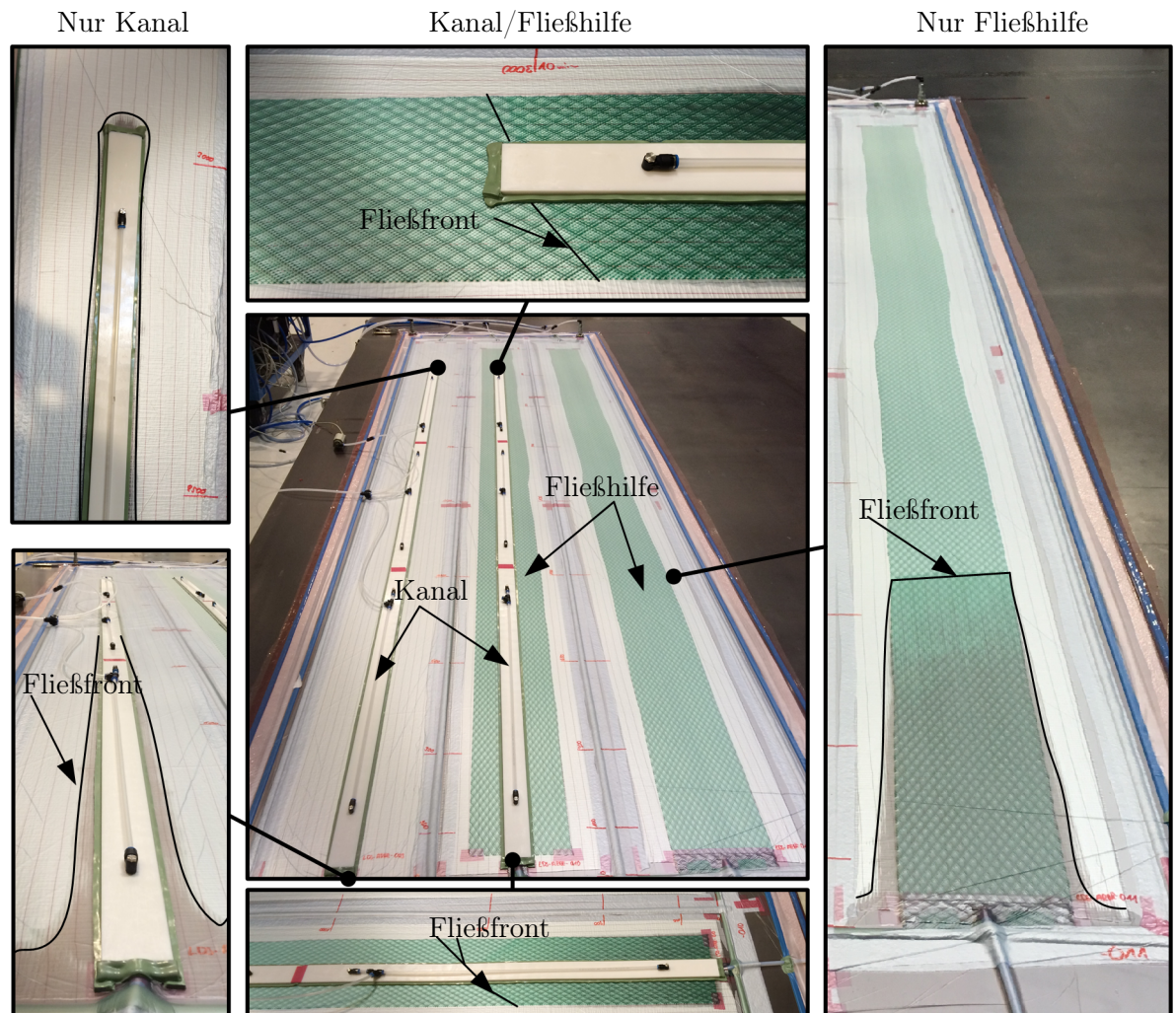


Abb. 3.5: Fließverhalten bei der Nutzung eines Kanals ohne Fließhilfe (links), bei der Nutzung einer Kombination aus Kanal und Fließhilfe (mitte) und nur Fließhilfe (rechts)

### Einspannbedingungen und Steifigkeit der Vakuumfolie

Nach Möglichkeit soll eine lösliche Verbindung zwischen Kanälen und Folie hergestellt werden. Hierdurch ergibt sich, gegenüber dem von van Herpt [36] patentierten Verfahren, der Vorteil, dass die Vakuumfolie für das nächste Bauteile einfach ausgetauscht werden



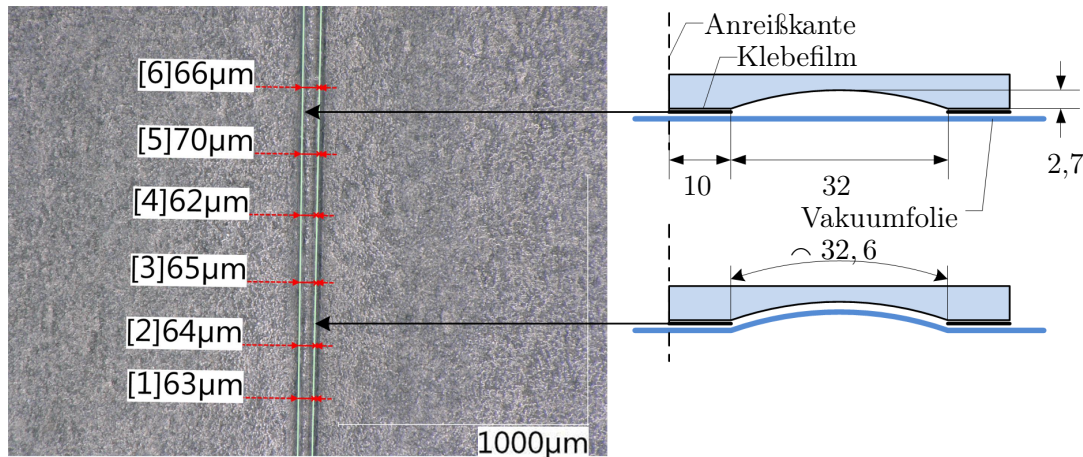


Abb. 3.6: Links: Eingebraachte Riefen in der Vakuumfolie zur Ermittlung des Folienrutschens aufgrund der Einspannbedingungen an den Kanalrändern. Rechts: Schematische Darstellung des Versuchs im unbelasteten (oben) und belasteten Zustand (unten).

kann. Für die Prozesssicherheit erscheint hierbei eine starre Randfesselung als probates Mittel. Ein weiterer Grund liegt in der notwendigen umlaufenden Abdichtung der Kanäle. Damit die Abdichtung und die damit einhergehende Randfesselung für die Versuche möglichst einfach umgesetzt werden kann, wird am Kanalrand ein doppelseitiger Klebefilm verwendet. Bei allen Versuchen wird somit von einer eingespannten Membran ausgegangen. Durch eine verschiebbliche Einspannbedingung ist zwar die erzielbare Folienverformung, also der Biegepfeil, wesentlich größer, aber diese Lagerungsbedingung muss auch in Bezug auf die Abdichtung eingehalten werden können.

Die Überprüfung, ob mit dem doppelseitigen Klebefilm die unverschiebbliche Lagerungsbedingung angenommen werden kann, erfolgt mit dem in Abb. 3.6 dargestellten Versuchsaufbau. Dazu wird der Kanal auf eine durch Vakuum fixierte Vakuumfolie aufgeklebt. Im unbelasteten Zustand, wenn der Kanal noch nicht evakuiert worden ist, wird mit Hilfe einer Anreißnadel die Folie entlang des Kanalrands markiert. Diese Markierung stellt die Referenzmarkierung dar. Nach der Evakuierung des Kanals, wenn die Folie belastet ist, wird durch die Anreißnadel eine weitere Markierung entlang des Kanalrands angebracht. In der Abb. 3.6 ist die Folie mit Hilfe eines Mikroskops untersucht worden. Es sind beide Markierungen deutlich zu erkennen. Eine Abstandsmessung an sechs Punkten zeigt, dass der mittlere Abstand ca. 65  $\mu\text{m}$  beträgt. Gegenüber der Längenänderung durch die Folienverformung ist dieser Wert, wie auch die folgende Variation der Foliensteifigkeit zeigt, mit 10% als sehr klein anzusehen. Daher wird die Annahme der starren Randfesselung bei der Verwendung der Vakuumfolie beibehalten.

Wird die Folie sehr steif, muss die Annahme einer starren Randfesselung überprüft werden. Versuche mit einer dünnen Stahlfolie zeigen, dass das Befestigen des Kanals mit doppelseitigem Klebefilm in diesem Fall nicht ausreicht, eine starre Randfesselung an-

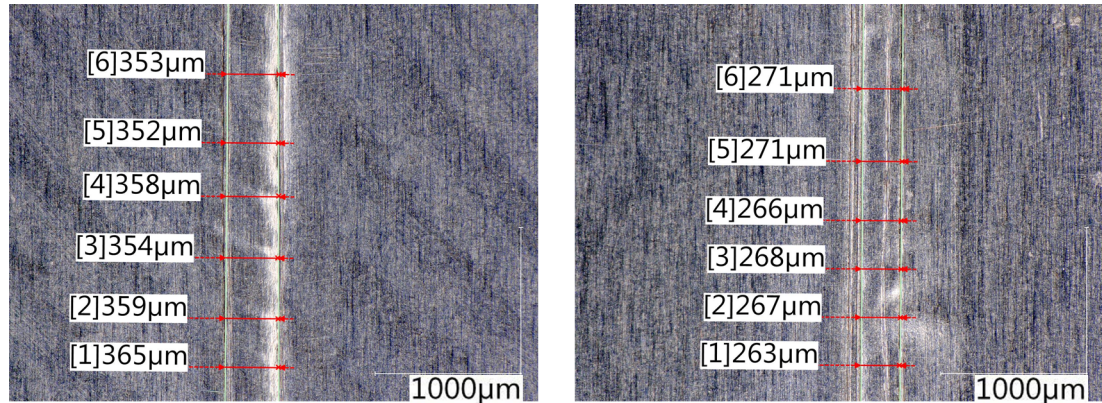


Abb. 3.7: Eingebrachte Riefen in der Metallfolie zur Ermittlung des Folienrutschens aufgrund der Einspannbedingungen an den Kanalrändern. Links: linker Kanalrand. Rechts: rechter Kanalrand

zunehmen. Die Abb. 3.7 zeigt mit einer Anreißnadel eingebrachte Riefen vor und nach der Evakuierung des Kanals. Durch die Abstandsmessung an mehreren Punkten der beiden Riefen kann die Differenz ermittelt werden. Für den linken Kanalrand ergibt sich ein Mittelwert von  $356,8 \mu\text{m}$  und für den rechten Kanalrand  $267,7 \mu\text{m}$ . Die Summe der Mittelwerte von  $624,5 \mu\text{m}$  entspricht in etwa der Differenz des Bogenmaßes innerhalb des Kanals und der Kanalbreite von  $620 \mu\text{m}$ . Die geringe Abweichung von  $4,5 \mu\text{m}$  ergibt sich aus den Messungenauigkeiten und den Fertigungstoleranzen des Kanals. Somit ist die angenommene starre Randfesselung in diesem Fall nicht zutreffend und die Anbindung des Kanals an die Folie müsste durch eine weniger nachgiebige Klebeverbindung hergestellt werden. Durch die nachgiebige Einspannung könnten auch größere Kanalquerschnitte erzeugt werden. Allerdings muss auch sichergestellt werden, dass die Folie sich aus der verformten Lage wieder in die Ausgangslage zurückverformt und die elastische Einspannung über den Prozess eingehalten werden kann.

Die für die Versuche verwendete Vakuumfolie Securlon L2000 besitzt eine Dicke von  $50 \mu\text{m}$ , wohingegen die Stahlfolie (Werkstoffnummer 1.4301) eine Stärke von  $0,25 \mu\text{m}$  aufweist. Der E-Modul der Stahlfolie ist mit ca.  $200 \text{ GPa}$  ([39]) um ein Vielfaches größer als der E-Modul der aus Polyamid (PA 6.6) bestehenden Vakuumfolie. Der E-Modul von Polyamid PA 6.6 ist stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Für die in Kapitel 3.3 gemachte Berechnung wird ein vergleichsweise hoher E-Modul von  $2700 \text{ MPa}$  ([31]) angenommen. Sinkt der E-Modul, hervorgerufen durch sich ändernde Umgebungsbedingungen, sinken auch die auftretenden Spannungen und der Biegepfel steigt an. Dies wird durch die Innenkontur des aufgesetzten Kanals verhindert und die theoretisch ermittelte Kanalgeometrie kann in den praktischen Versuchen eingehalten werden.

Vor allem die Feuchtigkeit hat einen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften der aus Polyamid bestehenden Vakuumfolien. Nach [12] sind zwischenmolekulare Wasserstoffbrückenbindungen für Polyamide charakterisierend. Diese Bindungen können sich mit

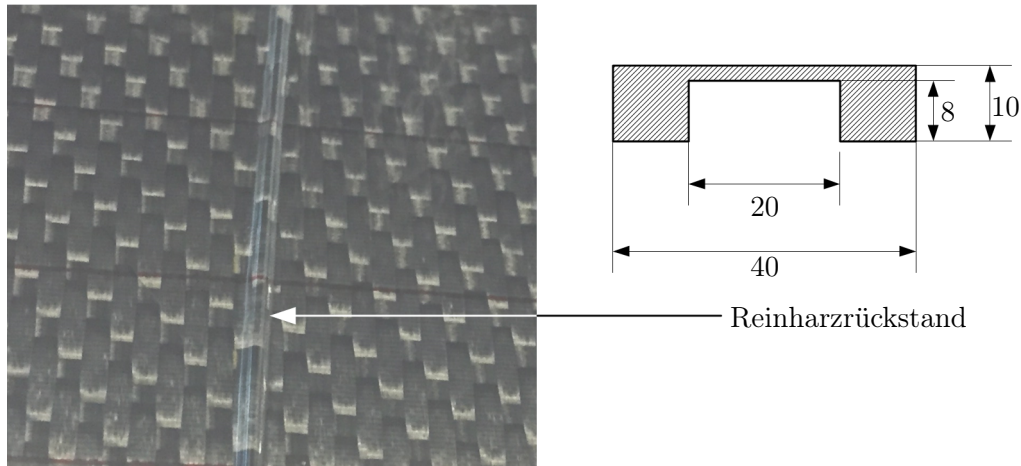


Abb. 3.8: Links: Reinharzrückstand durch plastische Verformung der Vakuumfolie  
Rechts: Nicht an die Folienverformung angepasste Kanalgeometrie

Substanzen verbinden, die ihrerseits Wasserstoffbrückenbindungen hervorbringen. Eine solche Substanz stellt auch Wasser dar, weshalb die Luftfeuchtigkeit einen Einfluß auf das mechanische Verhalten der Vakuumfolien ausübt.

Die Kunststoffvakuumfolie neigt zusätzlich zum Kriechen, weshalb dieses Verhalten durch die Geometrie der aufgesetzten Kanäle unterdrückt wird. Die Kanäle sind so gestaltet, dass sich die Folie bei maximaler Belastung an die Innenkontur anlegt. Hierdurch wird das Kriechen reduziert und es wird eine plastische Verformung unterbunden.

In der Abb. 3.8 ist für einen nicht an die Folienverformung angepassten Kanal das Ergebnis nach dem Druckausgleich und nach der Aushärtung des Laminats gezeigt. Der Reinharzrückstand zeigt eindeutig, dass durch das Kriechen der Kunststoffvakuumfolie eine Falte nach der Belüftung zurückbleibt. Hierdurch kann das überschüssige Harz aus dem Kanalbereich nicht abgeführt werden.

Durch die Stützwirkung des Kanals für die Vakuumfolie und das daraus resultierende Anlegen der Vakuumfolie an die Kanalinnengeometrie müssen die Vakuuman Anschlüsse geeignet angeordnet werden. Die Abb. 3.9 zeigt im linken Bildteil ein aus vier Einzelbildern überlagertes Gesamtbild und die zu den einzelnen Zeitpunkten vorhandene Fließfront. Zu den Zeitpunkten  $\tau_1$  bis  $\tau_3$  ist lediglich der Vakuuman schluß 1 geöffnet und der Kanal wird nur über diesen Anschluß evakuiert. Wie auch dem rechten Bildteil zu entnehmen ist, verschließt die Vakuumfolie diesen Anschluß bzw. dichtet in diesem Bereich den Kanal ab. Hierdurch kann der hintere Teil des Kanals nicht mehr evakuiert werden und Leckagen in der Kanalabdichtung begünstigen dieses Verhalten.

Deutlich ist die Änderung des Fließverhaltens zwischen den Zeitpunkten  $\tau_3$  und  $\tau_4$  zu erkennen. Der Vakuuman schluß 2 wird ab dem Zeitpunkt  $\tau_3$  geöffnet und somit auch der hintere Kanalbereich evakuiert. Hierdurch fließt das Harz im Kanalbereich schneller und



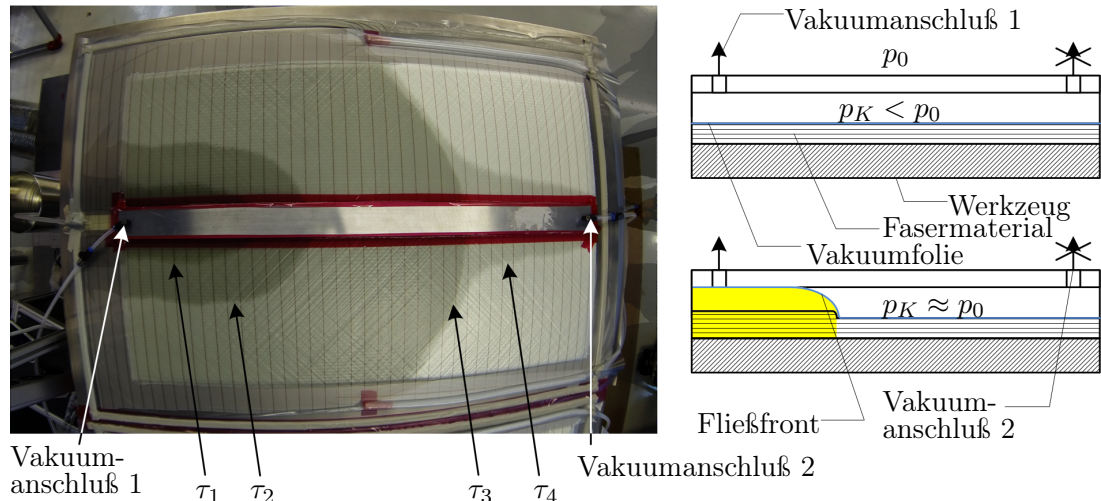


Abb. 3.9: Links: Fließfrontfortschritt und Beeinflussung der Fließfront durch Druckanpassung (Überlagerung von mehreren Bildern zu unterschiedlichen Zeitpunkten  $\tau_1$  bis  $\tau_4$  der Infusion); Rechts: Schematische Darstellung der Folienverformung in Kanallängsrichtung und Druckverhältnisse.

verteilt sich aus diesem Bereich in Richtung Bauteilbreite. Dieser Effekt kann durch eine entsprechende Regelung auch für die Manipulation einer Fließfront genutzt werden.

Ist der Druck innerhalb des Kanals nicht niedriger als der Kavitätsdruck, bildet sich der Harzfließkanal erst beim Einströmen des Harzes bzw. bei der Evakuierung des Kanals. Der Differenzdruck  $\hat{p}$  kann so angepasst werden, dass sich die Folie zeitgleich mit dem Einströmen des Harzes verformt. Dies kann entweder durch einen höheren Druck des Harzes geschehen oder durch einen sehr geringen Druck im aufgesetzten Kanal. Da die Folie durch den Kanal gestützt wird, führt ein höherer Druck, als der Auslegungsdifferenzdruck, nicht zu einer Beschädigung der Folie. Entspricht der Druck des Harzes in etwa dem Atmosphärendruck, hat sich ein Absolutdruck im Bereich von ca. 200 mbar bis 350 mbar im Kanal als besonders wirkungsvoll gezeigt. Dieser Druckbereich kann auch durch die Druckvariationsversuche in Abb. 3.4 bestätigt werden.

### 3.2 Aufstellung des mechanischen Ersatzmodells der Folienverformung

Zur Beschreibung der theoretischen Verformung der Vakuumfolie wird die Annahme getroffen, dass die Folie einer Membran entspricht. Diese Annahme ist notwendig, da die zu erwartende Durchbiegung der Folie die Dicke der Folie um ein vielfaches übersteigt. Dieses Verhältnis von Durchbiegung zu Dicke ist in den Gleichungen zur Bestimmung der Durchbiegung einer Platte nicht gegeben, da die Membran keine Biegemomente aufnehmen kann.[30]



### 3.2 Aufstellung des mechanischen Ersatzmodells der Folienverformung

Nach Wiedemann [64] kann für einen Membranwirkungsparameter  $\frac{\hat{p}}{E}(\frac{b}{t})^4 > 1000$  der Plattenbiegeanteil vernachlässigt werden. Dies entspricht einer Durchbiegung, die größer ist als die dreifache Membranstärke. Die Herleitung für eine rechteckige und an den Seiten fest eingespannte Membran kann dem Anhang A entnommen werden und folgt aus [25].

Des Weiteren wird die Annahme getroffen, dass die Folie eine konstante Dicke  $t_m$  besitzt, an den Rändern fest eingespannt und mit der konstanten Last  $\hat{p}$  nach Gleichung 3.1 belastet ist. Diese Last entspricht für den Auslegungsfall der Folienverformung der Druckdifferenz zwischen Kanalinnendruck  $p_{VK}$  und dem Harzdruck  $p_R$ .

$$\hat{p} = p_R - p_{VK} \quad (3.3)$$

Der konstante Lastfall tritt zwar erst ein, wenn sich das Harz entlang des Kanals verteilt hat und ein Druckausgleich stattgefunden hat. Aber diese Belastung ist der kritische Lastfall, da die größte Folienverformung auftritt. Daher wird dieser Zustand als Auslegungsfall betrachtet.

Für die Verformung der Membran im Kanalbereich kann das Ergebnis für die Biegeverformung aus Anhang A vereinfacht werden. Die Membrangeometrie im Kanalbereich ähnelt eher einem langen Membranstreifen, der aussieht, wie in Abb. 3.10 dargestellt

Als Vereinfachung wird daher die Annahme getroffen, dass die lange Seite der rechteckigen Membran sehr groß und damit das Seitenverhältnis  $\beta = \frac{a}{b}$  sehr klein wird. Somit entspricht die Membran einem langen Streifen.

$$\beta = \frac{a}{b} = 0 \quad \text{für } b \longrightarrow \infty \quad (3.4)$$

Damit und der Beziehung  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  kann der Biegefeil  $f$  für den Membranstreifen zu

$$f = \Theta(\nu) a \sqrt[3]{\frac{a \hat{p}}{t_m E}} \quad (3.5)$$

angegeben werden.

Hierbei vereinfacht sich auch der Faktor  $\Theta_\beta(\nu, \beta)$  aus A.17 zu  $\Theta(\nu)$ , da dieser nur noch von der materialabhängigen Querkontraktionszahl  $\nu$  und nicht mehr vom Seitenverhältnis  $\beta$  abhängt.

$$\Theta(\nu) = \sqrt[3]{\frac{73728 (1 - \nu^2)}{\pi^4 (81 \pi^2 - 256)}} \quad (3.6)$$

### 3 Modellierung der Verformung einer Vakuumfolie

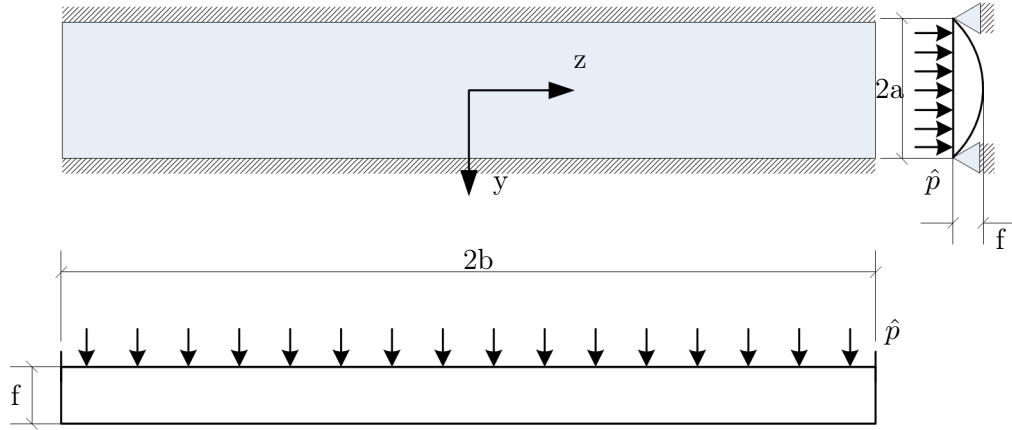


Abb. 3.10: Mechanisches Ersatzmodell für den Membranstreifen

$$f = \sqrt[3]{\frac{73728 (1 - \nu^2)}{\pi^4 (81 \pi^2 - 256)}} a \sqrt[3]{\frac{a \hat{p}}{t_m E}} \quad (3.7)$$

Dieser Biegepfad gilt nicht nur für den unendlich langen Membranstreifen, sondern auch für eine an den kurzen Seiten frei gelagerte Membran. Diese erfährt, wie in Abb. 3.10, nur eine einachsige Verformung und daher ist die Verformung entlang der langen Seite konstant.

Somit vereinfacht sich der allgemeine Ansatz (siehe A.1)

$$\xi(z, y) = f \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{2b}\right)$$

zu

$$\xi(y) = f \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{2a}\right) \quad (3.8)$$

Durch die Annahme einer Membran wird im Gegensatz zur zweidimensionalen Analogie eines Seils auch der Einfluß der Querkontraktion mit berücksichtigt.

### 3.3 Ermittlung einer theoretischen Kanalgeometrie

Aus Kapitel 3.2 ist der Biegepfel bzw. die gesamte Verformung im Kanalbereich bekannt. Durch die Integration von 3.8 ist es möglich, die Querschnittsfläche des Kanals zu bestimmen.

Aus der Integration folgt damit

$$A_K = \int_{-a}^a f \cos\left(\frac{\pi y}{2a}\right) dy = \frac{4af}{\pi} \quad (3.9)$$

Nach Volkersen [62] tritt die größte Spannung am Rand der Membran auf und beträgt

$$\sigma = \frac{\pi(3\pi - 4)f^2 E}{24a^2(1 - \nu^2)} \quad (3.10)$$

Hierbei ist bereits angenommen, dass der Membranstreifen eine unendliche Ausdehnung in z-Richtung hat (siehe Anhang B).

Durch Einsetzen der Gleichung 3.7 für den Biegepfel in Gleichung 3.10 ergibt sich

$$\sigma = \frac{\pi(3\pi - 4) \Theta(\nu)^2 \left(\sqrt[3]{\frac{a\hat{p}}{hE}}\right)^2 E}{24(1 - \nu^2)} \quad (3.11)$$

Hiermit kann die halbe Kanalbreite a

$$a = \frac{8 t_m}{\hat{p} \Theta(\nu)^3 \sqrt{E}} \left( \sqrt{\frac{6(1 - \nu^2) \sigma}{\pi(3\pi - 4)}} \right)^3 \quad (3.12)$$

bestimmt werden.

Somit kann auch der Biegepfel mit

$$f = \frac{\pi^2 (81\pi^2 - 256) t_m (1 - \nu^2) \sigma^2}{128(3\pi - 4)^2 \hat{p} E} \quad (3.13)$$

### 3 Modellierung der Verformung einer Vakuumfolie

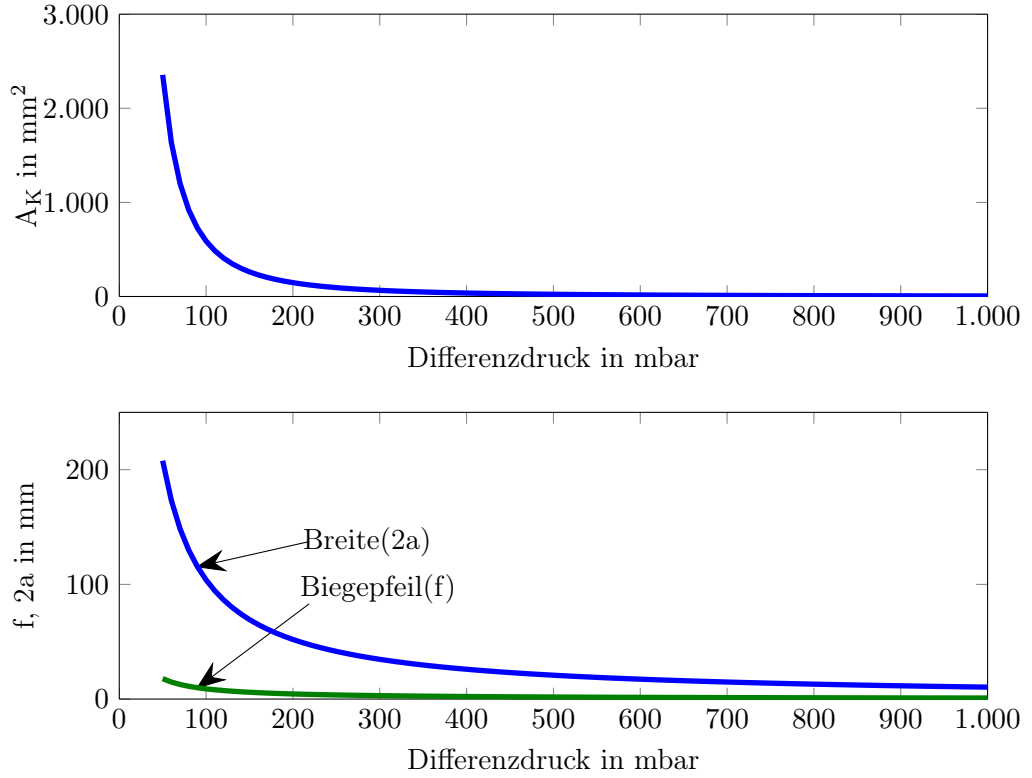


Abb. 3.11: Die Kanalquerschnittsfläche  $A_K$ , die Kanalbreite  $a$  und der Biegepfeil  $f$  in Abhängigkeit des Differenzdrucks  $\hat{p}$

angegeben werden. Damit ergibt sich für die Querschnittsfläche des Kanals  $A_K$

$$A_K = \frac{3(81\pi^2 - 256) t_m^2 (1 - \nu^2) \sigma^3}{2(3\pi - 4) \Theta(\nu)^3 \hat{p}^2} \sqrt{\frac{6(1 - \nu^2)\sigma}{E^3(3\pi - 4)\pi}} \quad (3.14)$$

Die Spannung  $\sigma$  in den Gleichungen für die halbe Kanalbreite 3.12, den Biegepfeil 3.13 und die Kanalquerschnittsfläche 3.14 kann durch die zulässige Spannung der Folie ersetzt und somit der Kanalquerschnitt in Abhängigkeit des Differenzdrucks  $\hat{p}$  bestimmt werden.

In der Abb. 3.11 ist der Verlauf der Querschnittsfläche, der Kanalbreite und des Biegepfeils in Abhängigkeit des Differenzdrucks grafisch ausgewertet. Je geringer der Differenzdruck zwischen Harz und Kanal ist, desto größer darf die Querschnittsfläche werden.

Die Abb. 3.12 zeigt ein Konstruktionsbeispiel für einen aufgesetzten Kanal. Der Berechnung liegt eine Vakuumfolie mit einem E-Modul  $E = 2700 \text{ N/mm}^2$ , einer Dicke

### 3.3 Ermittlung einer theoretischen Kanalgeometrie

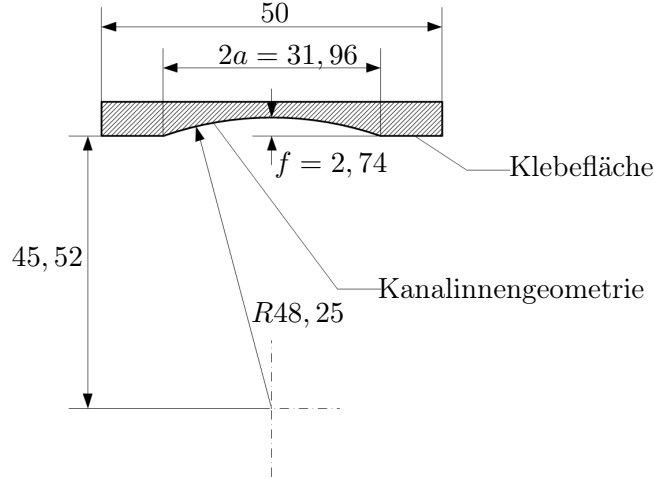


Abb. 3.12: Konstruktionsbeispiel für einen aufgesetzten Kanal (für eine Vakuumfolie mit den Eigenschaften  $E = 2700 \text{ N/mm}^2$ ,  $t_m = 0,1 \text{ mm}$ ,  $\nu = 0,25$ ,  $\sigma = 60 \text{ N/mm}^2$  und einen Differenzdruck  $\hat{p} = 650 \text{ mbar}$ ).

$t_m = 0,1 \text{ mm}$ , einer Querkontraktionszahl  $\nu = 0,25$  und einer Festigkeit  $\sigma = 60 \text{ N/mm}^2$  zu Grunde. Für einen robusten Prozess und eine gute Reproduzierbarkeit, muss der Druck innerhalb des aufgesetzten Kanals immer sicher erreicht werden können. Aus diesem Grund ist bei der Dimensionierung von einem Differenzdruck von  $\hat{p} = 650 \text{ mbar}$  ausgegangen worden. Ohne Berücksichtigung von Druckverlusten, wie zum Beispiel geodätischer Druckunterschied zwischen Harzvorrat und Kavität oder Querschnittsänderung, entspricht der angegebene Differenzdruck einem Druck im Kanal von  $p_{VK} = 350 \text{ mbar}$ . Vorausgesetzt der Umgebungsdruck bzw. der Druck des Harzes wird mit  $p_0 = p_R = 1000 \text{ mbar}$  angenommen. Die Kanalinnengeometrie ist aus fertigungstechnischen Gründen an einen Kreisabschnitt mit konstantem Radius angepasst worden.

#### Dickenänderung im Kanalbereich

Im Bereich des Kanals kommt es, durch den geringeren Umgebungsdruck zu einer Dekompression des Fasermaterials. Hierdurch ist das Fasermaterial in diesem Bereich dicker als in den Bereichen ohne Kanal und dies führt zu einer Verringerung des Faservolumengehalts im Kanalbereich. Die Gleichung 3.15 zeigt den Zusammenhang zwischen Kompressionsdruck  $\hat{p}$  und Faservolumengehalt  $\varphi_f$ . Hierbei gibt  $\varphi_a$  den maximal erreichbaren Faservolumengehalt und  $\varphi_0$  den Faservolumengehalt ohne Komprimierung an.[32]

$$\hat{p} = D \frac{\sqrt{\frac{\varphi_f}{\varphi_0}} - 1}{(\sqrt{\frac{\varphi_a}{\varphi_f}} - 1)^4} \quad (3.15)$$

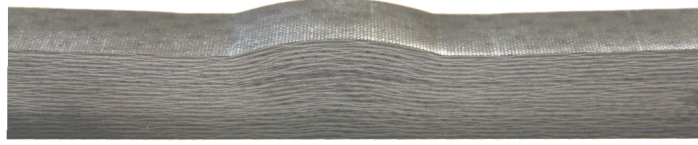


Abb. 3.13: Dickenänderung im Kanalbereich für 40 Lagen Hexcel Injectex G0926.

Allerdings sind die Ergebnisse stark von den Eingangsparametern, wie zum Beispiel maximal erreichbarer Faservolumengehalt  $\varphi_a$  und Federsteifigkeit  $D$ , abhängig. Zusätzlich ändert sich die Dicke durch die Anzahl der Zyklen aus Kompression und Dekompression [68]. Dies wird in dem Modell von Gutowski nicht berücksichtigt. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich durch die vom Kanal hervorgerufenen Lagerungsbedingungen. Dies führt dazu, dass die Dickenverteilung, wie die Abb. 3.13 zeigt, über den Kanalquerschnitt nicht konstant ist. In der Kanalmitte ist der Biegepeil am größten und an den Kanalrändern wird das Material durch die schmalen Kanalfüße noch stärker komprimiert als das übrige Fasermaterial. In der Abb. 3.2 ist das Verhalten bereits angedeutet worden.

Yenilmez und Sozer [69] haben mit verschiedenen Halbzeugen aus Glasfasern Untersuchungen zur Komprimierung und Dekomprimierung gemacht und dabei einen deutlichen Einfluß der Halbzeugarten festgestellt. Daher ist davon auszugehen, dass die Dickenänderung im Kanalbereich ebenfalls von der Art der Halbzeuge und Fasermaterialien abhängt.

Da die Vorhersage des Materialverhaltens im Kanalbereich mit analytischen Methoden sehr schwierig ist, wird im folgenden eine experimentelle Vorgehensweise vorgestellt. Hierzu werden, wie in Abb. 3.14 gezeigt, Stufenkeile mit unterschiedlichen Lagenanzahlen infundiert, ausgehärtet und anschließend vermessen. Als Fasermaterial wird für die Versuche das Kohlenstofffasergewebe Hexcel Injectex G0926 verwendet. Es wird bei jedem Versuch die Lagenanzahl variiert und das Laminat symmetrisch  $([0/90]_s)$  aufgebaut. Der Kanal wird in der Mitte des Fasermaterials positioniert und der Angusspunkt befindet sich bei jedem Versuch auf der Seite mit der höheren Lagenanzahl. Bis zur Aushärtung des Harzes wird der Kanal evakuiert und erst nach der Aushärtung belüftet.

Aus der Abb. 3.15 kann entnommen werden, dass, für diesen speziellen Lagenaufbau, mit steigender Lagenanzahl die Dickenänderung  $\Delta t_{FK}$  linear zunimmt. Für die Approximation kann

$$\Delta t_{FK2a} = 0,19 \bar{t}_F \quad (3.16)$$

angegeben werden. Die Dickendifferenz  $\Delta t_{FK}$  ist hierbei die Differenz aus dem höchsten Punkt der Dickenänderung und der durchschnittlichen Laminatdicke  $\bar{t}_F$  (Abb. 3.16).

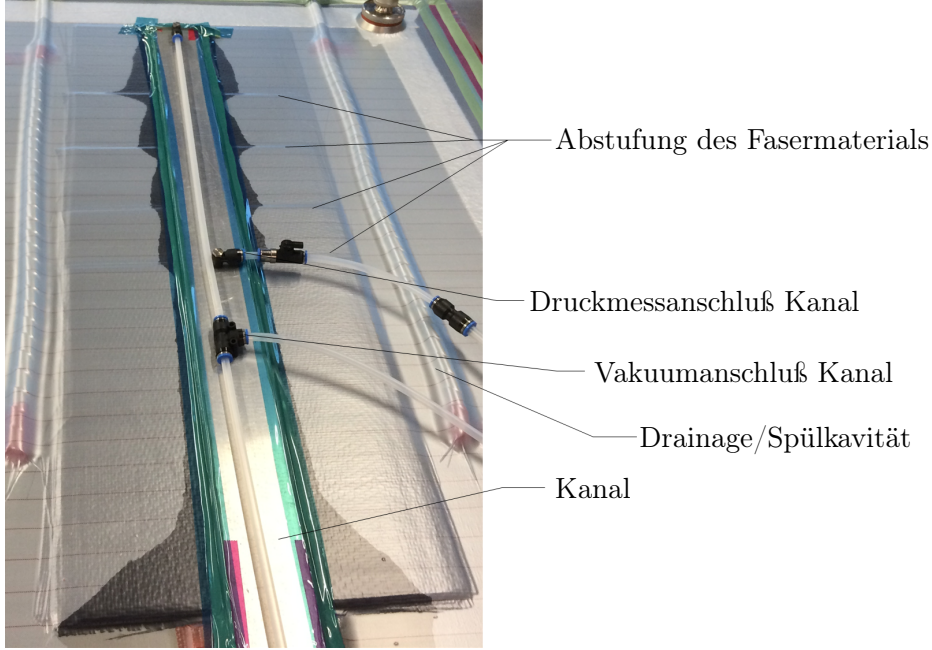


Abb. 3.14: Herstellung eines Stufenkeils zur experimentellen Bestimmung der Dickenänderung des Fasermaterials im Kanalbereich

Mit Gleichung 3.16 kann auch für eine gegebene Kanalgeometrie die maximale Laminatdicke bzw. Lagenanzahl bestimmt werden, bis das Fasermaterial den gesamten Kanal ausfüllt. Als Maximalanzahl wird hierbei verstanden, dass bei Überschreiten dieser Dicke nur noch die geänderte Permeabilität den Harzfluß beeinflusst und der überlagerte Reinharzkanal nicht mehr vorhanden ist.

Durch die Dickenänderung des Fasermaterials wird die Querschnittsfläche des überlagerten Strömungskanals reduziert. Näherungsweise kann die Querschnittsfläche der Dickenänderung im Kanalbereich durch einen Kreisabschnitt mit der Höhe  $\Delta t_{FK}$  und der Sehnenlänge  $2a$  beschrieben werden.

$$A_{AK} = \frac{\Delta t_{FK}}{12a} (3\Delta t_{FK}^2 + 16a^2) \quad (3.17)$$

Für das Fasermaterial Hexcel Injectex G0926 ergibt sich eine maximale Laminatdicke von 14,5 mm, wenn der Kanal für einen Differenzdruck von 650 mbar ausgelegt wird (Abb. 3.17 links). Wird die Kanalbreite verdoppelt (Abb. 3.15 rechter Bildteil), so ändert sich die Gleichung für die Approximation in 3.18.

$$\Delta t_{FK4a} = 0,46 \bar{t}_F \quad (3.18)$$

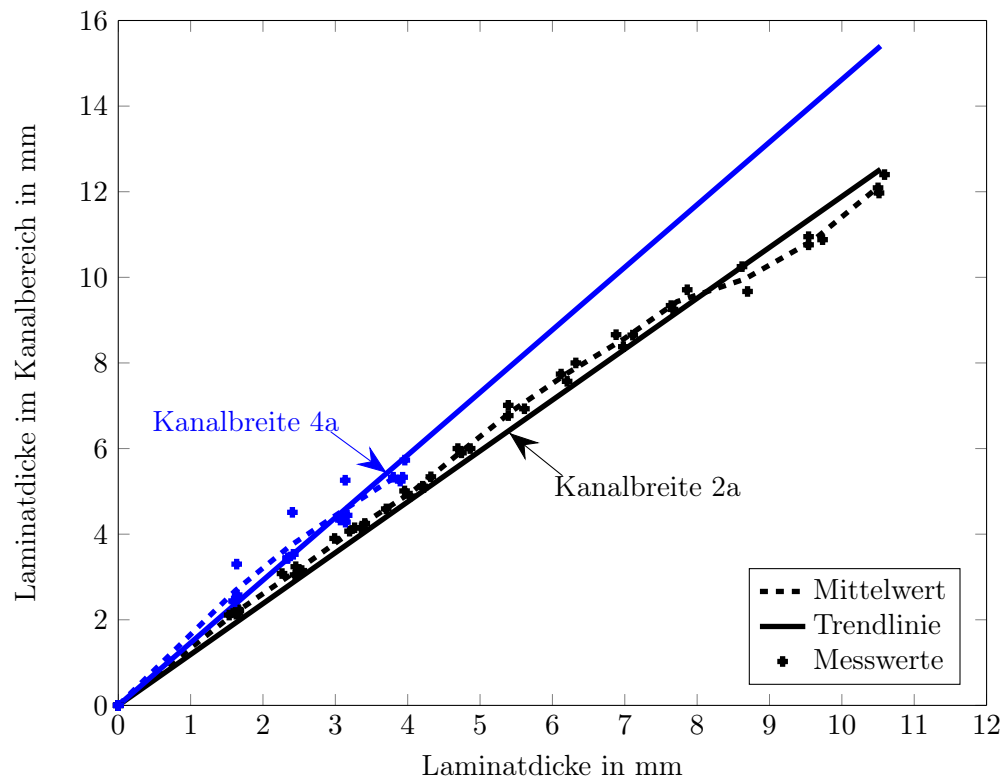


Abb. 3.15: Dickendifferenz zwischen Dickenänderung im Kanalbereich und Laminatdicke (Fasermaterial Hexcel G0926, Lagenaufbau  $[0/90]_s$ ; Kanalbreite  $2a=32\text{mm}$  in Schwarz und Kanalbreite  $4a=64\text{mm}$  in Blau dargestellt). Die Punkte geben die einzelnen Messpunkte wieder.

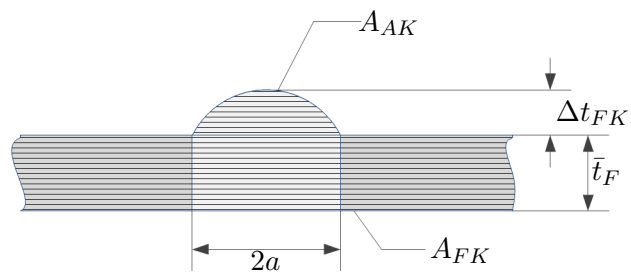


Abb. 3.16: Dickendifferenz zwischen Dickenänderung im Kanalbereich und Laminat



### 3.3 Ermittlung einer theoretischen Kanalgeometrie

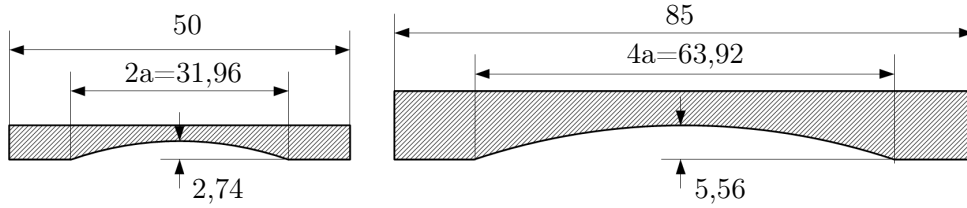


Abb. 3.17: Größenvergleich zwischen den Kanälen

Gleichung 3.18 zeigt, dass sich die Steigung der Approximation bei einer Verdopplung der Kanalbreite vergrößert. Allerdings kann die Kanalhöhe bei einer Vergrößerung der Kanalbreite, wie der Größenvergleich in Abb. 3.17 zeigt, auch größer werden. Die maximale Laminatdicke sinkt jedoch auf etwa 12 mm ab.

Durch Fixieren der einzelnen Lagen kann das Aufwölben des Fasermaterials im Kanalbereich minimiert werden. Abb. 3.18 zeigt hierzu den Unterschied mit Hilfe von Schliffbildern. Praktisch kann die Lagenfixierung durch die Aktivierung eines Binders erfolgen. Somit werden alle Lagen vor der Infiltration miteinander verbunden und durch diese Verbindung steigt die Gesamtbiegesteifigkeit an bzw. die Federwirkung der Einzellagen wird reduziert.

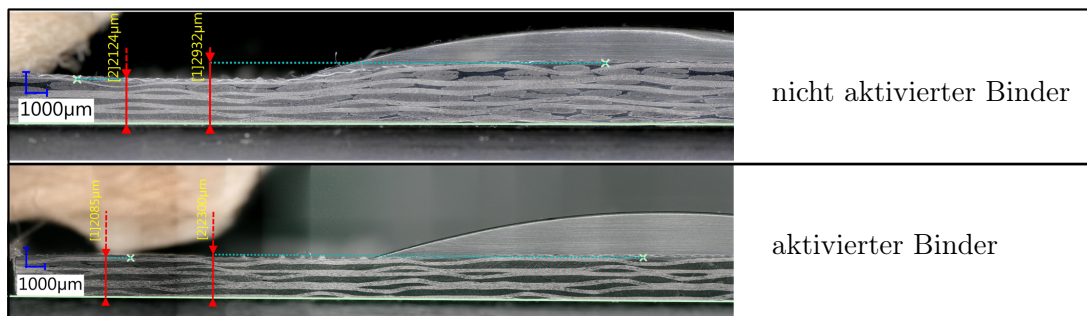


Abb. 3.18: Vergleich zwischen aktiviertem und nicht aktiviertem Binder

Als Binder eignen sich hierfür selbstvernetzende oder thermoplastische Binder. Nach [61] vernetzt ein selbstvernetzender Binder durch Temperaturerhöhung und bleibt auch bei der sich anschließenden Infusion in diesem Zustand. Der thermoplastische Binder löst sich ebenfalls nicht in der Matrix auf, sondern bleibt als Zusatzstoff erhalten und kann daher auch zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften genutzt werden. Hingegen reagiert ein mitvernetzender Binder mit dem Matrixsystem, da diese Binderart aus einem zum Matrixsystem kompatiblen Stoff besteht. Daher ist diese Binderart nicht geeignet, um die Aufwölbung zu verhindern.

Nach [38] sind für ein Spaltimprägnierungsverfahren Untersuchungen zum Verschieben von Fasern gemacht worden. Hierbei hat sich gezeigt, dass durch den Einsatz eines thermoplastischen Bindervlieses keine Verschiebungen innerhalb des Fasermaterials stattfinden.

den. Bei latenten Harzsystemen empfiehlt sich daher auch die Verwendung thermoplastischer Binder.

## 3.4 Zusammenfassung der Modellbildung

Die prinzipielle Verfahrensbeschreibung erläutert die für die anschließende Dimensionierung der Kanalgeometrie gemachten Randbedingungen und Annahmen. Für die Auslegung bzw. Bestimmung der Kanalinnengeometrie ist die Vakuumfolie als seitlich unverschieblich gelagerte Membran angenommen worden, da die Durchbiegung weit über die Folienstärke hinausgeht. Als kritischer Auslegungsfall wird eine flächig verteilte Last angenommen, die sich aus der Differenz des maximalen Drucks des Harzes und dem Innendruck des Kanals ergibt.

Außerdem ist die Dickenänderung des Fasermaterials im Kanalbereich, die durch die niedrigere Komprimierung entsteht, experimentell ermittelt worden. Bei zwei unterschiedlich breiten Kanälen hat sich ein linearer Zusammenhang zwischen Laminatdicke und Dickenänderung im Kanalbereich erkennen lassen. Zusätzlich ist die Wirkung eines aktivierten Binders auf die Verformung des Fasermaterials bestimmt worden. Es hat sich gezeigt, dass durch die Binderfixierung das Fasermaterial versteift werden kann und somit die Ausbiegung minimiert wird.

Die lösbare Fixierung der Kanäle auf der Vakuumfolie und außerhalb der Kavität birgt den Vorteil, dass die Kanäle jederzeit zugänglich sind. Damit können auch während der Infusion noch Kanäle hinzugefügt werden. Dieser Vorteil kann bei Infusionsprozessen genutzt werden, bei denen Fehlstellen durch nicht durchtränktes Fasermaterial drohen und das Harz in diese kritischen Bereiche umgeleitet werden soll.

Eine Entfernung der Kanäle ist hingegen nicht zwingend erforderlich, da die Kanäle durch einen Druckausgleich deaktiviert werden können und den Infusionsprozess dann nicht mehr beeinflussen. Somit lässt sich das Verfahren auch bei der Infusion von Prototypenbauteilen, bei denen der Verlauf der Fließfront schwer abzuschätzen ist, einsetzen.

Des Weiteren ermöglicht die lösbare Fixierung der Kanäle einen einfachen Austausch der Vakuumfolie nach der Aushärtung des Laminats. Dadurch wird die Kontamination der Vakuumfolie durch Staub und Harzreste vermieden und eine aufwendige Reinigung und Kontrolle der Folie kann entfallen. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit die Vakuumfolie wiederzuverwenden, da die Kanäle die Folie nicht plastisch verformen.

## 4 Ermittlung eines Kanalkennwerts

Die anfangs aufgestellte Arbeitshypothese I besagt, dass die höhere Faserpermeabilität im Kanalbereich die strömungsmechanischen Verluste, aufgrund der kreisabschnittsförmigen Kanalgeometrie, ausgleichen kann. Die Kanalgeometrie muss in diesem Fall kreisabschnittsförmig gestaltet sein, da aufgrund der Überlegungen in Kapitel 3.3 die Vakuumfolienverformung diese Geometrie vorgibt. Aus [10] und [11] ist bekannt, dass Abweichungen von kreisförmigen Angussquerschnitten strömungsmechanisch durch Anstieg des Druckverlusts, ungünstig sind. Dies kann mit der geringen Benetzungsfläche im Vergleich zur Querschnittsfläche und nach dem Newtonschen Fluidreibungsgesetz der daraus resultierenden geringeren Fluidreibung begründet werden. In [11] wird zur überschlägigen Beurteilung der Kanalleistungsfähigkeit der hydraulische Radius herangezogen. Für die Harzverteilungskanäle kann diese einfache Vorgehensweise nicht angewendet werden, da die Permeabilität des Fasermaterials sonst nicht berücksichtigt werden kann.

Aus diesem Grund wird ein Kanalkennwert, der den Reinharz- und den Permeabilitätsanteil des Fasermaterials berücksichtigt, ermittelt. Dieser Kanalkennwert entspricht einer Permeabilität und soll daher als Ersatzpermeabilität bezeichnet werden. Die Mischung der Permeabilitäten aus Reinharzanteil und Faserpermeabilität gleicht somit dem Fluss des Harzes durch ein sehr poröses Material (Faservolumengehalt ist sehr niedrig). Damit mit dieser Permeabilität auch eine Fließsimulation gestaltet werden kann, müssen die zusätzlichen Parameter Dicke und Faservolumengehalt bekannt sein.

Eine Verifikation der Ersatzpermeabilität wird durch die Simulation mit der Software RTM- Worx (Polyworx) eines kreisförmigen Kanalquerschnitts gezeigt, wobei auch mit Hilfe der Carman- Kozeny Beziehung auf die veränderliche Faserpermeabilität im Kanalbereich eingegangen wird. Abschließend wird durch einen Vergleich zwischen einem kreisabschnittsförmigen und kreisförmigen Kanal der notwendige Größenbereich der Faserpermeabilität zur Kompensation der Strömungsverluste ermittelt.

Für die Bildung der Ersatzpermeabilität wird angenommen, dass sich der Gesamtmassenstrom  $\dot{m}_G$  aus der Summe der beiden Teilmassenströme  $\dot{m}_K$  und  $\dot{m}_{FK}$  zusammensetzt. Der Massenstrom  $\dot{m}_K$  ist, wie in Abb. 4.1 dargestellt, der Massenstromanteil im Reinharzkanal und der Massenstromanteil im Fasermaterial ist  $\dot{m}_{FK}$ .

$$\dot{m}_G = \dot{m}_K + \dot{m}_{FK} \quad (4.1)$$

#### 4 Ermittlung eines Kanalkennwerts

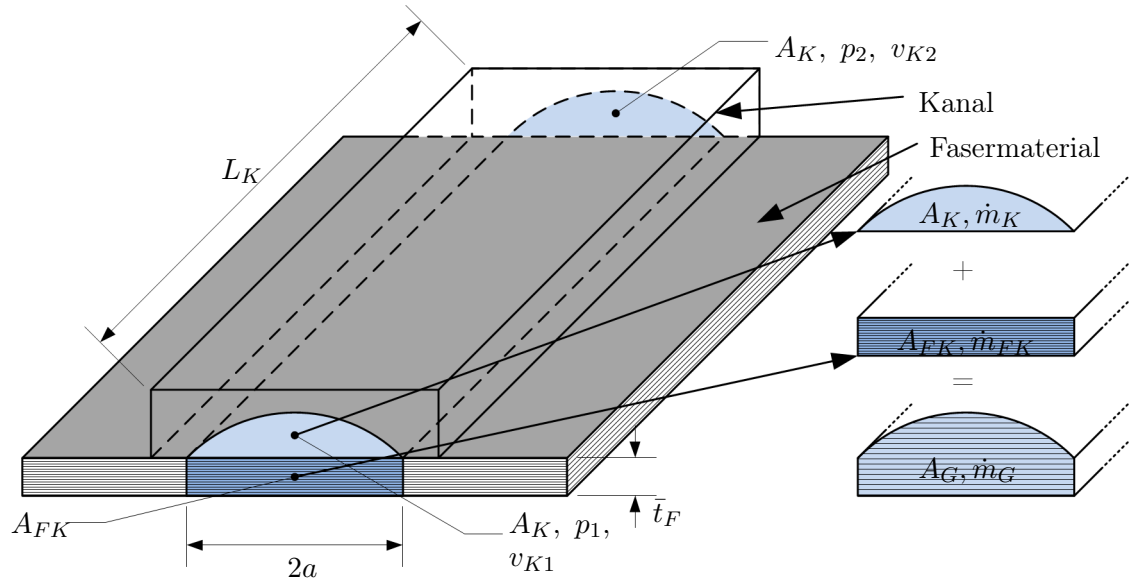


Abb. 4.1: Flächen- und Massenstromaufteilung

Diesem Ansatz liegt die Annahme zu Grunde, dass das Harz primär entlang des Kanals fließt und kein Massenanteil in das restliche Fasermaterial abströmt.

Da die Dichte des Harzes in allen Bereichen gleich bleibt und als inkompressibel angenommen werden kann, gilt die Gleichung 4.1 auch für den Volumenstrom  $\dot{V}$ .

$$\dot{V}_G \rho_R = (\dot{V}_K + \dot{V}_{FK}) \rho_R \quad (4.2)$$

Der Volumenstrom ist hierbei das Produkt aus Fließgeschwindigkeit  $v$  und Querschnittsfläche  $A$ . Somit gilt:

$$v_G A_G = v_K A_K + v_{FK} A_{FK} \quad (4.3)$$

Die Gesamtquerschnittsfläche  $A_G$  wird aus der Summe der Kanalquerschnittsfläche  $A_K$  und der Querschnittsfläche des Fasermaterials im Kanalbereich  $A_{FK}$  gebildet.

#### Strömung im überlagerten Kanal

Für den Reinharzkanal gilt die Bernoulli-formel in allgemeiner Form:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_R g} + \frac{v_{K1}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_R g} + \frac{v_{K2}^2}{2g} + h_V \quad (4.4)$$

Die Variable  $h_V$  ist die Reibungsverlusthöhe und beschreibt den Druckverlust zwischen Position 1 und Position 2. Für die weitere Berechnung wird angenommen, dass es keinen Höhenunterschied gibt und somit  $z_1 = z_2 = 0$  gilt.

$$\frac{p_1}{\rho_R g} + \frac{v_{K1}^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho_R g} + \frac{v_{K2}^2}{2g} + h_V \quad (4.5)$$

Die Verlusthöhe  $h_V$  folgt aus der Darcy-Weisbach Gleichung

$$h_V = \lambda \frac{L_K}{4r_{Hyd}} \frac{v_K^2}{2g} \quad (4.6)$$

Der hier enthaltene hydraulische Radius  $r_{Hyd} = \frac{A_K}{U_K}$  ist der Quotient aus Kanalquerschnittsfläche  $A_K$  zu Kanalumfang  $U_K$  und berücksichtigt, dass der Kanal vom kreisrunden Querschnitt eines Rohres abweicht. Der Rohreiwert  $\lambda$  ist stark von der Reynoldszahl  $Re$  abhängig und es gilt für eine laminare Strömung  $Re < 2300$  (vgl. Anhang C).

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4.7)$$

$$\lambda = \frac{64 \mu}{v_K 4 r_{Hyd} \rho_R} \quad (4.8)$$

$$\lambda = \frac{16 \mu U_K}{v_K A_K \rho_R} \quad (4.9)$$

Somit ergibt sich die Verlusthöhe mit der Kanallänge  $L_K$  zu

$$h_V = \frac{2 \mu U_K^2 L_K v_K}{A_K^2 \rho_R g} \quad (4.10)$$

Durch Einsetzen von 4.10 in 4.5 und unter Berücksichtigung, dass die Geschwindigkeiten  $v_{K1}$  und  $v_{K2}$  aufgrund der Kontinuitätsgleichung gleich sein müssen, gilt:

#### 4 Ermittlung eines Kanalkennwerts

$$\frac{p_1}{\rho_R} = \frac{p_2}{\rho_R} + \frac{2 \mu U_K^2 L_K v_K}{A_K^2 \rho_R} \quad (4.11)$$

Damit folgt für die Geschwindigkeit im Kanal  $v_K$ , mit der Druckdifferenz  $\Delta p = p_1 - p_2$ :

$$v_K = \frac{\Delta p A_K^2}{2 \mu U_K^2 L_K} \quad (4.12)$$

#### Strömung im Fasermaterial

Für die Fließgeschwindigkeit des Harzes im Fasermaterial des Kanalbereiches  $v_{FK}$  kann das Gesetz von Darcy (Gleichung 2.1) angewendet werden.

$$v_{Darcy} = \frac{K}{\mu(1 - \varphi_F)} \frac{dp}{dx} \quad (4.13)$$

Hierbei beschreibt  $K$  die Permeabilität,  $\varphi_{FK}$  den Faservolumengehalt und  $\frac{dp}{dx}$  den Druckgradienten. Somit gilt für die Geschwindigkeit im Fasermaterial im Kanalbereich:

$$v_{FK} = \frac{K_{FK}}{\mu(1 - \varphi_{FK})} \frac{\Delta p}{L_K} \quad (4.14)$$

#### Gesamtströmung

Für die Geschwindigkeit  $v_G$  kann auch das Gesetz von Darcy mit einer Ersatzpermeabilität  $K_E$  aufgestellt werden:

$$v_G = \frac{K_E}{\mu(1 - \varphi_E)} \frac{\Delta p}{L_K} \quad (4.15)$$

Aus 4.15 kann die Geschwindigkeit  $v_G$  ermittelt werden und damit sind alle Geschwindigkeiten für die Gleichung 4.3 bekannt.

$$\frac{K_E A_G}{\mu(1 - \varphi_E) L_K} \frac{\Delta p}{L_K} = \frac{A_K^3}{2 \mu U_K^2 L_K} \frac{\Delta p}{L_K} + \frac{K_{FK} A_{FK}}{\mu(1 - \varphi_{FK}) L_K} \frac{\Delta p}{L_K} \quad (4.16)$$

Aus dieser Gleichung kann die gesuchte Ersatzpermeabilität  $K_E$  ermittelt werden:

$$K_E = \left( \frac{A_K^3}{2 U_K^2} + \frac{K_{FK} A_{FK}}{(1 - \varphi_{FK})} \right) \frac{1 - \varphi_E}{A_G} \quad (4.17)$$

$$K_E = \frac{A_K^3}{2 U_K^2 A_G} (1 - \varphi_E) + K_{FK} \frac{A_{FK}}{A_G} \frac{(1 - \varphi_E)}{(1 - \varphi_{FK})} \quad (4.18)$$

Hierbei gilt, wie in der Abb. 4.1 dargestellt, für die Gesamtquerschnittsfläche  $A_G = A_K + A_{FK}$ .

### Notwendige Simulationsparameter für $K_E$

Mit Hilfe der Ersatzpermeabilität 4.18 kann ein äquivalenter Strömungskanal in einer Fließsimulationssoftware dargestellt werden. Hierbei müssen für den Kanalbereich zusätzlich der Faservolumengehalt und die Laminatstärke bekannt sein. Der Ersatzfaservolumengehalt  $\varphi_E$  kann durch die Betrachtung der Faservolumengehaltsdefinition ermittelt werden:

$$\varphi_F = \frac{V_{Faser}}{V_{Laminat}} \quad (4.19)$$

$$\varphi_F = \frac{V_{Faser}}{V_{Faser} + V_{Harz} + V_{Poren}} \quad (4.20)$$

Das Volumen des Gesamtlaminats  $V_{Laminat}$  ist die Summe aus dem Volumen der Fasern  $V_{Faser}$ , dem Volumen des Harzes  $V_{Harz}$  und dem Volumen der Poren  $V_{Poren}$ .

Der Ersatzfaservolumengehalt  $\varphi_E$  bezieht sich hierbei auf den Faservolumengehalt im gesamten Kanalbereich, weshalb das Laminatvolumen  $V_{Laminat}$  auch den Harzanteil des überlagerten Reinharzkanals beinhaltet. Aus Kapitel 3.3 ist bekannt, dass der Faservolumengehalt des Fasermaterials im Kanalbereich  $\varphi_{FK}$  während der Infusion nicht zwingend dem Faservolumengehalt des übrigen Laminats  $\varphi_F$  entspricht. Dies wird durch den wesentlich geringeren Differenzdruck im Kanalbereich hervorgerufen. Somit ergibt sich ein Faservolumen  $V_{Faser}$  im Kanalbereich von:

$$V_{Faser} = \varphi_{FK} V_{FK} \quad (4.21)$$

$$V_{Faser} = \varphi_{FK} A_{FK} L_K \quad (4.22)$$

Daraus folgt mit 4.20

#### 4 Ermittlung eines Kanalkennwerts

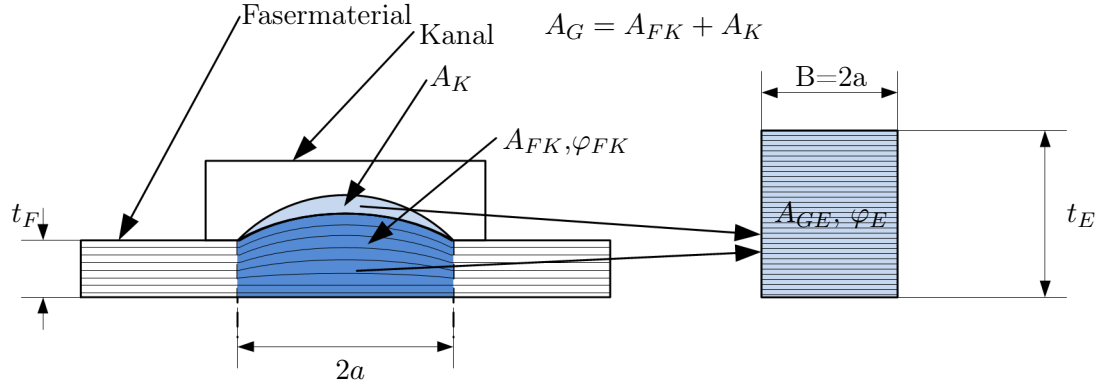


Abb. 4.2: Ersatzquerschnittsfläche für Kanal mit Kreisabschnittsquerschnitt

$$\varphi_E = \frac{\varphi_{FK} V_{FK}}{V_G} \quad (4.23)$$

$$\varphi_E = \frac{\varphi_{FK} A_{FK}}{A_G} \quad (4.24)$$

Wird die Dickenänderung des Fasermaterials, z.B. durch Binderaktivierung, im Kanalbereich verhindert, entspricht der Faservolumengehalt im Kanalbereich dem Faservolumengehalt außerhalb des Kanalbereichs  $\varphi_{FK} = \varphi_F$ . Wenn der Reinharzanteil im Kanalbereich verschwindet, weil das gesamte Volumen durch das Fasermaterial (mit entsprechendem Harzanteil) ausgefüllt wird, sind auch die Flächen  $A_{FK}$  und  $A_G$  gleich. In diesem Fall entspricht der Ersatzfaservolumengehalt  $\varphi_E$  dem Faservolumengehalt im Kanalbereich  $\varphi_{FK}$  ( $\varphi_E = \varphi_{FK}$ ).

Aus Gleichung 4.24 ist der Faservolumengehalt für den Kanalbereich bekannt, wobei das Porenvolumen  $V_{Poren}$  für diese Betrachtung vernachlässigt worden ist. Für die Ersatzlaminatstärke  $t_E$  können die Gesamtquerschnittsflächen vom Original  $A_G$  und vom Ersatzmodell  $A_{GE}$  gleich gesetzt werden.

$$A_{GE} = A_G \quad (4.25)$$

$$B t_E = A_G \quad (4.26)$$

$$t_E = \frac{A_G}{B} \quad (4.27)$$

Im übrigen wird, wie in Abb. 4.2 gezeigt, von einem rechteckigen Ersatzquerschnitt ausgegangen. Durch diese Annahme kann eine Simulation sehr einfach umgesetzt werden.

Die durch Gleichung 4.18 bestimmte Ersatzpermeabilität gilt, aufgrund der Einbeziehung des hydraulischen Radius, näherungsweise nur für kreisförmige oder kreisabschnittsförmige Querschnitte. Weicht die Gestalt des Querschnitts zuweit ab, wird nach [59] der



#### 4.1 Verifikation der Ersatzpermeabilität und Simulationsbeispiele

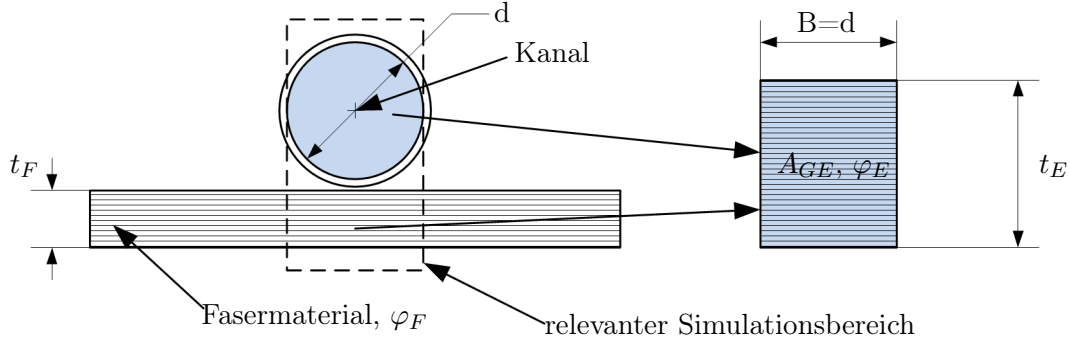


Abb. 4.3: Ersatzquerschnittsfläche für Kanal mit Kreisquerschnitt

Druckverlust nicht mehr adäquat beschrieben. Dies zeigt sich insbesondere für rechteckige oder quadratische Querschnitte. In [1] wird für diesen Fall eine Ersatzpermeabilität unter Berücksichtigung der Hagen-Poiseuille Strömung angegeben.

### 4.1 Verifikation der Ersatzpermeabilität und Simulationsbeispiele

Für die Verifikation wird ein kreisförmiger Kanalquerschnitt gewählt, wie in Abb. 4.3 gezeigt. Die Kanalquerschnittsfläche  $A_K$  besitzt folglich die Fläche eines Kreises und für den Umfang  $U_K$  gilt entsprechendes. Damit folgt für die Ersatzpermeabilität eines Kreisquerschnitts mit Fasermaterial:

$$K_{E,Kreis} = \frac{d^4\pi}{32(d^2\pi + B t_F)}(1 - \varphi_E) + K_F \frac{4Bt_F}{d^2\pi + 4B t_F} \frac{(1 - \varphi_E)}{(1 - \varphi_F)} \quad (4.28)$$

Für die Ersatzdicke  $t_{E,Kreis}$  und für den Ersatzfaservolumengehalt  $\varphi_{E,Kreis}$  gilt:

$$t_{E,Kreis} = \frac{B t_F + \frac{d^2}{4}\pi}{B} \quad (4.29)$$

$$\varphi_{E,Kreis} = \varphi_F \frac{B t_F}{B t_F + \frac{d^2}{4}\pi} \quad (4.30)$$

Mit diesen drei Parametern können die Kanalfüllzeiten für einen Kanal mit Kreisquerschnitt und einem Kanal, der durch die Ersatzpermeabilität gebildet wird, verglichen werden.

Für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen den beiden Simulationsmöglichkeiten muss das Harzvolumen für beide Simulationen gleich sein. Daher wird bei der Simulation des

#### 4 Ermittlung eines Kanalkennwerts

Tabelle 4.1: Füllzeiten, die in der Simulation berechnet werden

Füllgrad	25%	35%	50%	70%	100%
Kanal + Fasermaterial	13,52s	18,92s	27,04s	37,86s	54,09s
Ersatzpermeabilität	13,54s	18,93s	27,05s	37,87s	54,1s

Tabelle 4.2: Parameter für die Simulation der einzelnen Kanäle (Abb. 4.4)

	Kanal + Fasermaterial	Ersatzpermeabilität
Durchmesser,Breite	d=8mm	B=8mm
Dicke ( $t_E, t_F$ )	2mm	8,3mm
Permeabilität	$1,84 \cdot 10^{-10} m^2$	$1,334 \cdot 10^{-6} m^2$
Volumenstrom	$7 \cdot 10^{-7} m^3/s$	
Druck	1bar	
Viskosität	250 mPas	
Kanallänge	650mm	

Kanals mit kreisrundem Querschnitt auch das Fasermaterial unterhalb des Kanals berücksichtigt (Abb. 4.3).

In Abb. 4.4 und Tabelle 4.1 ist hierzu ein Vergleich der mit RTM- Worx (Polyworx) simulierten Kanalfüllzeiten gezeigt. Die Software basiert auf der Finite Elemente Methode und löst mit diesem Verfahren die physikalischen Grundgleichungen, die die Strömung eines newtonschen Fluids durch ein poröses Medium dominieren. Ab ca. 25% Gesamt-füllgrad zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der numerisch simulierten Füllzeiten. Die leichte Zeitdifferenz kann, wie bei den weiteren Simulationsuntersuchungen auch, mit der inhomogenen Harzausbreitung zu Beginn der Imprägnierung begründet werden (siehe Abb. 4.9).

Für die Simulation sind die in Tabelle 4.2 angegebenen Parameter verwendet worden.

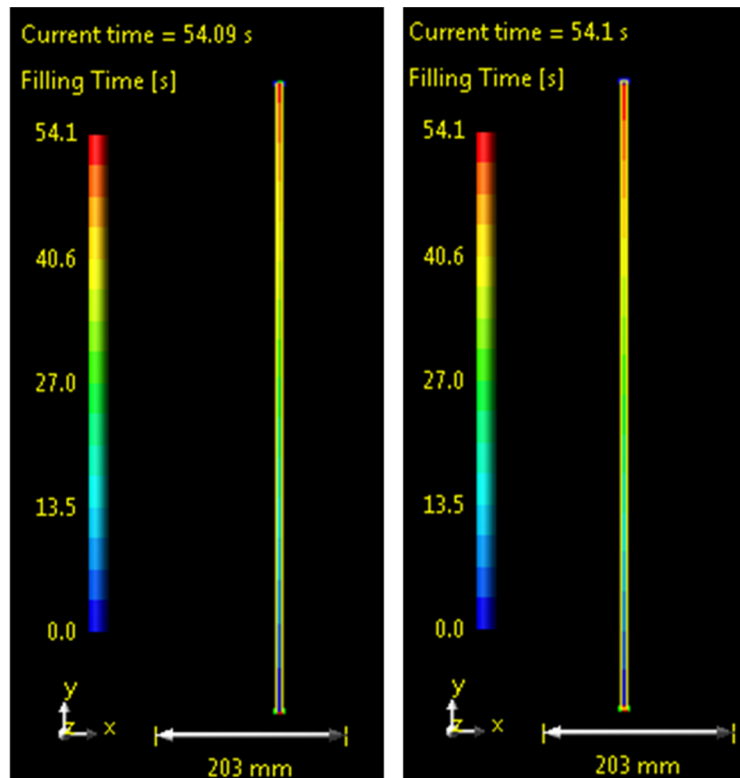


Abb. 4.4: Vergleich der Kanalfüllzeiten zwischen Kanal mit Fasermaterial (links) und der Ersatzpermeabilität (rechts). Der geringe zeitliche Unterschied kann mit der inhomogenen Harzzuführung durch einen Punktanguss bei der Ersatzpermeabilität begründet werden.

### Veränderliche Faserpermeabilität im Kanalbereich

Verändert sich der Faservolumengehalt des Fasermaterials innerhalb des Kanalbereichs, aufgrund des geringeren Differenzdrucks zwischen Atmosphäre und Kavität gegenüber dem restlichen Laminatbereich, wird auch die Permeabilität des Fasermaterials beeinflusst. Ein einfacher Ansatz für die Abschätzung der Permeabilitätsänderung aufgrund des geringeren Faservolumengehalts stellt die Carman-Kozeny Beziehung dar. [1]

$$K_{FK} = C_{CK} \frac{(1 - \varphi_{FK})^3}{\varphi_{FK}^2} \quad (4.31)$$

Unter der Annahme, dass im Kanalbereich das gleiche Fasermaterial (aber mit dem Faservolumengehalt  $\varphi_{FK} \neq \varphi_F$ ) wie im restlichen Laminat verwendet wird, gilt für die Carman-Kozeny Konstante  $C_{CK}$

$$C_{CK} = K_F \frac{\varphi_F^2}{(1 - \varphi_F)^3} \quad (4.32)$$

Hierbei stellt  $K_F$  die Permeabilität des Fasermaterials im ungestörten Laminatbereich dar und  $\varphi_F$  beschreibt den Faservolumengehalt. Die Carman-Kozeny Konstante  $C_{CK}$  ist ein materialabhängiger Parameter und hängt streng genommen nicht nur von der Fasermaterialarchitektur, sondern nach [67] auch vom Faservolumengehalt ab. Allerdings ist diese Abhängigkeit vom Faservolumengehalt für das angegebene Beispiel nicht relevant, da ein fiktives Fasermaterial simuliert wird. Außerdem soll das Beispiel nur grundsätzlich zeigen, welche Änderungen sich hinsichtlich der Füllzeit bei Änderung des Faservolumengehalts ergeben. Mit diesen Annahmen ergibt sich für die Ersatzpermeabilität im Kanalbereich

$$K_{E,\varphi} = \frac{A_K^3}{2 U_K^2 A_G} (1 - \varphi_E) + \left( C_{CK} \frac{(1 - \varphi_{FK})^3}{\varphi_{FK}^2} \right) \frac{A_{FK}}{A_G} \frac{(1 - \varphi_E)}{(1 - \varphi_{FK})} \quad (4.33)$$

Für einen Kanal bei dem der Reinharzanteil vollständig vorhanden ist ( $A_K = 100\%$ ), ergibt sich eine Füllzeit von 77,81s. In der Abb. 4.5 sind für unterschiedliche Faservolumengehalte im Kanalbereich  $\varphi_{FK}$  die Füllzeiten dargestellt. Es können bisher nur Untersuchungen für einen vollständig ausgebildeten oder einen verschwindenden Reinharzkanal gemacht werden, da bei Zwischengrößen der Umfang  $U_K$  unbekannt ist. Dieser Umfang hängt stark vom verwendeten Fasermaterial ab, da hiervon die Dickenänderung des Fasermaterials im Kanalbereich abhängt.

Die Füllzeiten in Abb. 4.5 zeigen, dass bei einem fehlendem Reinharzanteil die Füllzeiten stark ansteigen. Sinkt der Faservolumengehalt im Kanalbereich, sinkt auch die

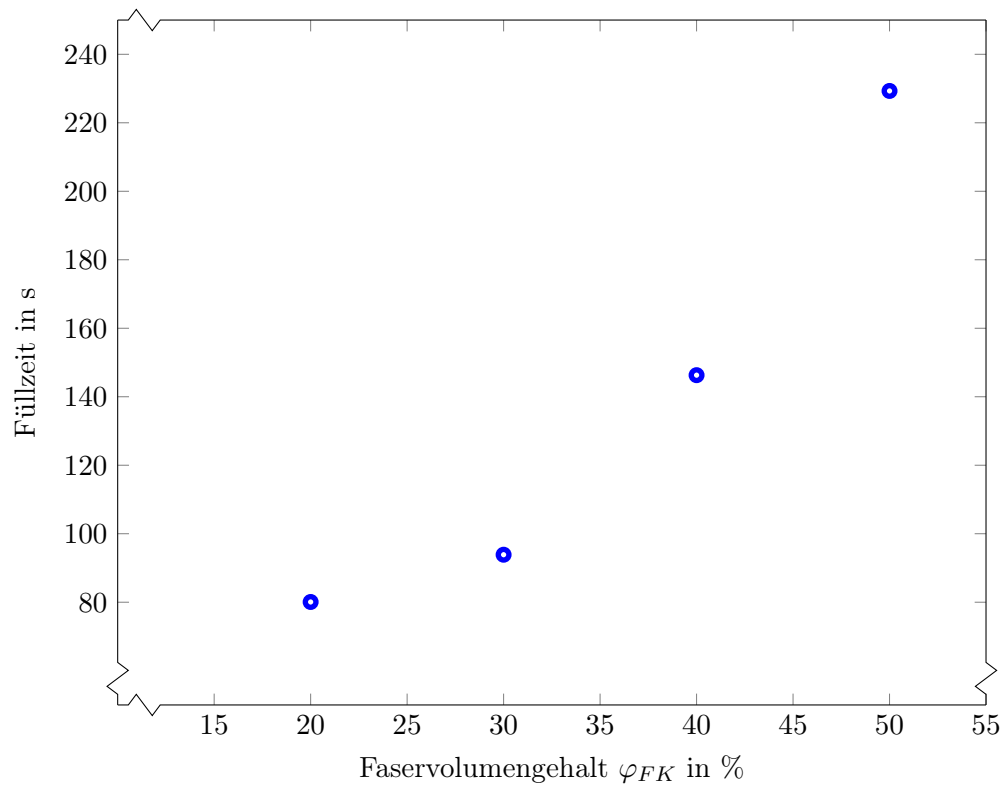


Abb. 4.5: Füllzeit in Abhängigkeit des Faservolumengehalts im Kanalbereich, wenn kein Reinharzanteil vorhanden ist ( $A_K = 0$ )

Füllzeit. Dies kann mit der höheren Permeabilität bei sinkendem Faservolumengehalt erklärt werden. Um die Füllzeit möglichst gering zu halten, sollte der Reinharzanteil im Kanal möglichst groß sein. Praktisch kann dies durch die Aktivierung des Binders im Kanalbereich erfolgen. In diesem Fall kann die Faserpermeabilität im Kanalbereich auch nahezu vernachlässigt werden, da die Faserpermeabilität gegenüber der Reinharzkanalpermeabilität sehr gering ist.

Als zweite Möglichkeit, aber praktisch schwierig umzusetzen, müsste der Faservolumengehalt des Fasermaterials im Kanalbereich möglichst niedrig sein.

## 4.2 Ersatzpermeabilität als Vergleichskennwert

Vielfach werden Infusionskanäle mit kreisrundem Querschnitt für die Infiltration von trockenen Faserverbundbauteilen genutzt. Damit bestehen für viele Bauteile bereits Erfahrungswerte für die Verteilung dieser Kanäle. Außerdem stellen kreisrunde Kanalquerschnitte, aus strömungsmechanischer Sicht, das Optimum dar. Um zu beurteilen, ob die Faserpermeabilität den höheren Druckverlust ausgleichen kann, werden ein kreisrunder und ein kreisabschnittsförmiger Kanalquerschnitt miteinander verglichen. Die Ersatzpermeabilität ermöglicht in diesem Zusammenhang eine einfache Vergleichsmethode zur Ermittlung eines Querschnitts des Vakuumdifferenzdruckverfahrens. Hierzu wird, anders als in Gleichung 4.28, nur die Ersatzpermeabilität für den kreisrunden Kanalquerschnitt durch

$$K_{E,Kreis} = \frac{d^2}{32} \quad (4.34)$$

verwendet. Für einen kreisrunden Kanalquerschnitt  $d=8\text{mm}$  folgt eine Ersatzpermeabilität  $K_{E,Kreis} = 2 \cdot 10^{-6} \text{m}^2$ .

Für den kreisabschnittsförmigen Querschnitt (Gleichung 4.18), wie in Abb. 4.6 dargestellt, kann durch eine iterative Lösung der für einen gegebenen Kreisquerschnitt äquivalente kreisabschnittsförmige Querschnitt ermittelt werden. Im Gegensatz zum kreisförmigen Kanalquerschnitt trägt das Fasermaterial beim kreisabschnittsförmigen Kanalquerschnitt zum Fluß des Harzes bei und muss daher in der Rechnung berücksichtigt werden.

Aus Kapitel 3.2 sind die notwendigen Gleichungen zur Bestimmung der Kanalgeometrie in Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte der Folie und des Differenzdrucks bekannt. In der Abb. 4.7 ist der schematische Ablauf zur iterativen Bestimmung der Kanalgeometrie dargestellt. Ausgehend vom Differenzdruck  $\hat{p}$  können die Parameter für die Kanalgeometrie und die Ersatzpermeabilität bestimmt werden.

Im einfachen Fall einer zum übrigen Fasermaterial gleichen Permeabilität im Kanalbereich vereinfacht sich 4.18 zu

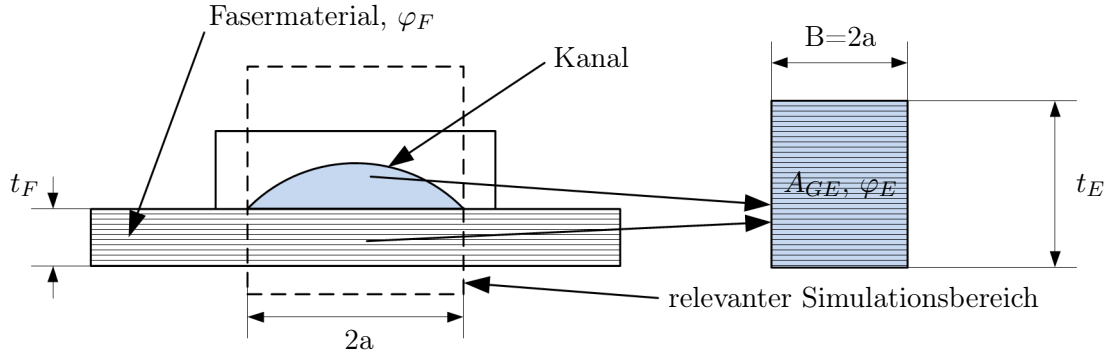


Abb. 4.6: Ersatzquerschnittsfläche für Kanal mit Kreisquerschnitt und Kreisabschnittsquerschnitt

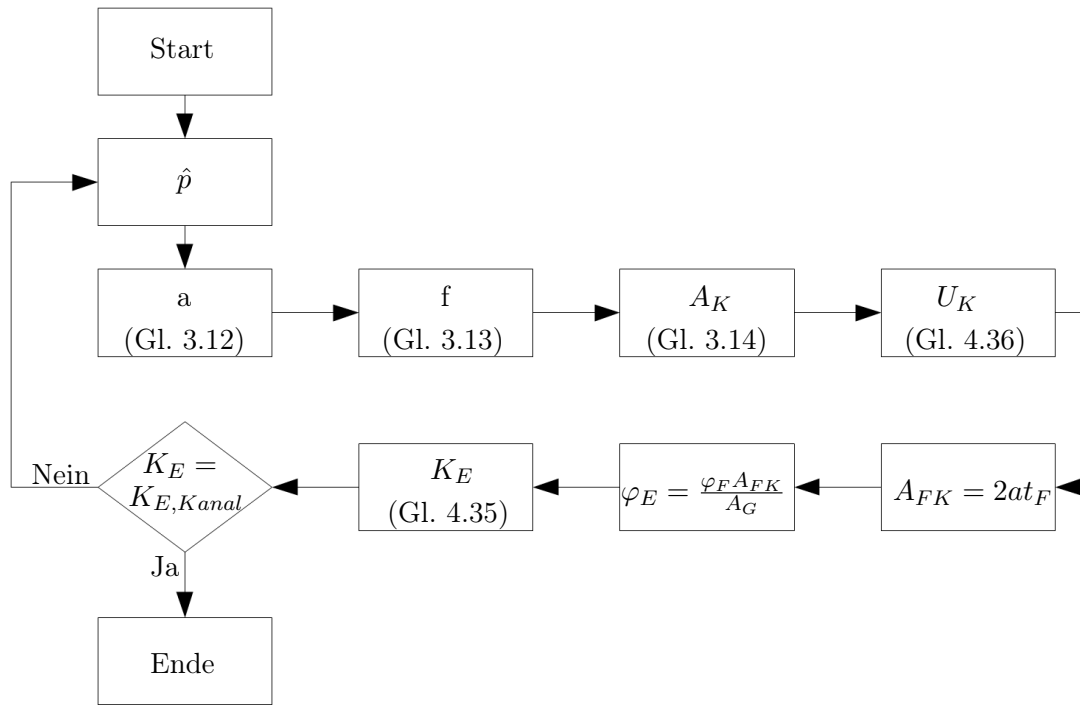


Abb. 4.7: Schematische Darstellung zum Ablauf der iterativen Bestimmung der Kanalgeometrie

$$K_E = \frac{A_K^3 (1 - \varphi_E)}{2 U_K^2 (2 a t_F + A_K)} + \frac{K_F A_{FK} (1 - \varphi_E)}{(2 a t_F + A_K) (1 - \varphi_F)} \quad (4.35)$$

Wird zusätzlich die Änderung der Dicke des Fasermaterials im Kanalbereich verhindert, kann der gesuchte Umfang  $U_K$  näherungsweise aus der Summe des Bogenmaßes eines Kreisabschnitts und der Kanalbreite  $2a$  bestimmt werden.

$$U_K = \frac{f}{2} + \frac{4a^2}{8f} 2 \arcsin \left( \frac{a}{\frac{f}{2} + \frac{4a^2}{8f}} \right) + 2a \quad (4.36)$$

Die iterative Berechnung zeigt, dass sich eine halbe Kanalbreite  $a=89,4\text{mm}$  und eine Kanalfläche  $A_K = 459\text{mm}^2$  ergibt. Bei einem kreisrunden Querschnitt mit einem Durchmesser  $d = 8\text{mm}$  hat der Kanal eine Querschnittsfläche von  $A_{K,Kreis} = 50\text{mm}^2$ . Diese um das 9-fache kleinere Querschnittsfläche demonstriert den strömungsmechanischen Unterschied, wenn die Ersatzpermeabilität bei beiden Kanälen gleich ist.

Um die Füllzeiten simulativ vergleichen zu können, muss die Gesamtharzmenge der Vergleichsbauteile gleich sein. Im Fall des kreisabschnittsförmigen Kanalquerschnitts ist die Harzmenge aufgrund der größeren Querschnittsfläche wesentlich höher, als beim kreisförmigen Querschnitt. Bei einem realen Bauteil wäre die Harzmenge beider Bauteile gleich. Jedoch lässt die Simulationssoftware RTM- Worx es nicht zu, den Harzfluß frühzeitig zu stoppen und das Harz aus dem Kanal für die vollständige Durchtränkung des Fasermaterials zu nutzen. Daher wird die Breite des Bauteils für die Simulation des kreisförmigen Querschnitts erhöht, wodurch das Gesamtharzvolumen dem Referenzbauteil entspricht. Die Parameter für die Simulation sind in der Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Außerdem muss für die Simulation beachtet werden, dass der Permeabilitätsunterschied zwischen der Ersatzpermeabilität und dem übrigen Fasermaterial nicht zu groß wird. Ansonsten wird der numerische Fehler laut der Softwaredokumentation sehr groß, weshalb bei den Simulationen ein Faktor von 1000 nicht überschritten wird.

Es werden jeweils zwei ebene Bauteile miteinander verglichen, bei denen die Bauteillänge verdoppelt wird. Die simulierte Füllzeit zeigt bei beiden Vergleichen eine gute Übereinstimmung. In der Abb. 4.8 ist die Harzmenge in Abhängigkeit der Füllzeit dargestellt. Bei beiden Plattengrößen sind gute Übereinstimmungen zu erkennen. Die kleinen Abweichungen sind auf den inhomogenen Materialzufluss im Kanalbereich der Ersatzpermeabilität zurückzuführen. Die Abb. 4.9 zeigt die sich am Beginn des Füllvorganges radial um den Anguspunkt ausbildende Fließfront.

Als Resultat des Vergleichs muss festgehalten werden, dass die Faserpermeabilität zu klein ist, um den Druckverlust aufgrund der kreisabschnittsförmigen Kanalgeometrie auszugleichen. Sogar die aus Simulationsgründen frei gewählte Faserpermeabilität im



## 4.2 Ersatzpermeabilität als Vergleichskennwert

Tabelle 4.3: Parameter für die Fließsimulation und Bauteilfüllzeiten

Parameter	Ersatzpermeabilität		Kanal	
Länge	650mm	1300mm	650mm	1300mm
<b>Simulierte Füllzeit</b>	<b>164,4s</b>	<b>329s</b>	<b>164,4s</b>	<b>329s</b>
Breite	300mm		708,8mm	
Kanalbreite/Durchmesser	2a=178,8mm		d=8mm	
Bauteildicke im Kanalbereich $t_E$	7,1mm		2mm	
Faservolumengehalt im Kanalbereich $\varphi_E$	14 %		-	
Laminatdicke $t_F$	2 mm			
Faservolumengehalt im Bauteil $\varphi_F$	50 %			
Permeabilität $K_F$	$2 \cdot 10^{-9}m^2$			
Permeabilität $K_E$	$2 \cdot 10^{-6}m^2$			
Bauteildicke $t_F$	2mm			
Viskosität $\mu$	250 mPas			
Volumenstrom	$3 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}$			
Druck	1bar			

Größenbereich von  $10^{-9} m^2$  (entspricht dem Permeabilitätsbereich einer Fließhilfe([40])) kann den Verlust nicht neutralisieren.

Eine Abschätzung der notwendigen Faserpermeabilität zum Ausgleichen des Strömungsverlusts kann durch Gleichsetzen der Strömungsquerschnitte  $A_K$  (Gleichung 3.14) und der Querschnittsfläche des Kreises

$$A_{K,Kreis} = \frac{d^2 \pi}{4} \quad (4.37)$$

erfolgen. Hierdurch kann der notwendige Differenzdruck  $\hat{p}$  bestimmt werden.

$$\hat{p} = \sqrt{\frac{3 (81\pi^2 - 256) t_m^2 (1 - \nu^2) \sigma^3}{2 (3\pi - 4) \Theta(\nu)^3 A_{K,Kreis}}} \sqrt{\frac{6(1 - \nu^2)\sigma}{E^3 (3\pi - 4)\pi}} \quad (4.38)$$

Mit dem Druck  $\hat{p}$  werden die übrigen Kanalgeometrien, wie Biegepfeil  $f$  (3.13) und Kanalhalbbreite  $a$  (3.12), berechnet. Somit kann die Gleichung 4.18 für die Ersatzpermeabilität  $K_E$  zur gesuchten Größe der Faserpermeabilität im Kanalbereich  $K_{FK}$  aufgelöst werden.

$$K_{FK} = \frac{K_{E,Kanal} - \frac{A_{K,Kreis}^3}{2U_K^2 A_G} (1 - \varphi_E)}{\frac{A_{FK}}{A_G} \frac{(1 - \varphi_E)}{(1 - \varphi_{KF})}} \quad (4.39)$$

#### 4 Ermittlung eines Kanalkennwerts

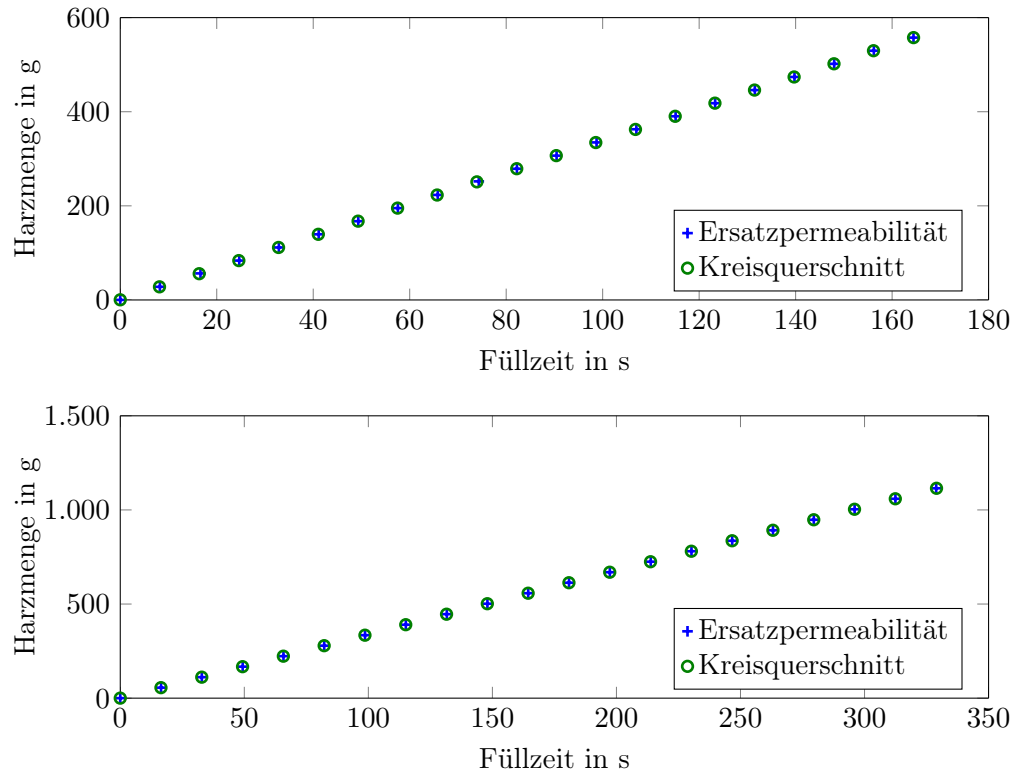


Abb. 4.8: Simulierte Harzmenge in Abhängigkeit der Füllzeit für Plattenlänge 650mm (oben) und Plattenlänge 1300mm (unten)

Als Ergebnis zeigt sich, dass die Faserpermeabilität im Kanalbereich  $K_{FK} = 2,4 \cdot 10^{-6} m^2$  betragen muss. Dieser Wert ist 20 % größer als die Permeabilität für den kreisrunden Kanalquerschnitt und daher für typische Fasermaterialien viel zu groß.

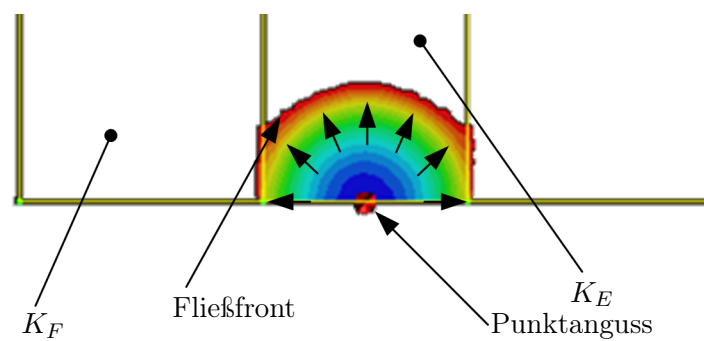


Abb. 4.9: Fließfront, die sich radial um den Punktanguss ausbildet und daher zu minimal größerer Füllzeit bei der Simulation der Ersatzpermeabilität führt.

## 4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Kanalkennwert, in Form der Ersatzpermeabilität, zur Beurteilung der Kanalleistungsfähigkeit genutzt werden kann. Mit dieser Ersatzpermeabilität können Fließsimulationen und Vergleiche zwischen konventionellen und für die Vakuumdifferenzdruckinfusion benötigte Kanäle gemacht werden.

Bei allen durchgeführten Simulationen mit der Fließsimulationssoftware RTMWorx, ist nur der Füllvorgang bei ausgebildetem Kanal berücksichtigt worden. Die Simulationsumgebung RTMWorx bietet nicht die Möglichkeit, das Abfließen des Harzes aus dem Kanalbereich bei Druckausgleich zu simulieren. Des Weiteren muss davon ausgegangen werden, dass aufgrund des Relaxationsverhaltens des Fasermaterials die Permeabilität und der Faservolumengehalt sich zeitlich ändern. Dieses Verhalten kann durch die verwendete Software nicht abgebildet werden. Daher ist für den Vergleich des Füllvorgangs jeweils von gleichen Harzvolumina, die durch Anpassung der Bauteilgröße geschaffen worden sind, ausgegangen worden.

Das Ergebnis des Vergleichs von kreisrundem und kreisabschnittsförmigem Kanal zeigt auch, dass die in Kapitel 2.4 aufgestellte Arbeitshypothese I

“Wenn die für die elastische Foliendeformation notwendige Kanalgeometrie zur Verteilung des Harzes genutzt wird, kann die im Kanalbereich auftretende höhere Faserpermeabilität den strömungsmechanischen Verlust ausgleichen.”

revidiert werden muss. Die Leistungsfähigkeit der Kanäle des neuen Verfahrens ist aus strömungsmechanischer Sicht sehr viel geringer als die der herkömmlichen Kanäle. Dieses Verhalten muss bei der Auslegung der Infusionsstrategie unbedingt berücksichtigt werden und führt zu größeren Kanalquerschnitten bzw. zu einer höheren Anzahl an Kanälen. Die größeren Kanalquerschnitte und die höhere Kanalanzahl führen jedoch nicht zu einem Anstieg des Harzverbrauchs, da das Harzvolumen in den Kanälen für die Tränkung des Bauteils genutzt werden kann.



## 5 Auswirkungen des Verfahrens auf verschiedene Laminataufbauten

Ein wesentliches Merkmal des Verfahrens stellt die Positionierung der Harzverteilungskanäle auf dem Faserverbundbauteil dar. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Kanäle keine oder nur sehr schwach ausgeprägte Abdrücke auf dem ausgehärteten Bauteil hinterlassen. Diese Annahme ist in der Arbeitshypothese II im Kapitel 2.4 bereits aufgestellt worden.

Die Abb. 5.1 zeigt die Abdrücke auf verschiedenen CFK Laminaten, die bei der Verwendung herkömmlicher Angusskanäle (sog. Omega Flowlines) entstehen. Deutlich zu erkennen sind die Aufwölbungen am Kanalrand und der höhere Harzanteil in diesem Bereich. In der Kanalmitte, wo das Harz im Kanal verteilt wird, ergibt sich ebenfalls eine deutlich größere Laminatdicke. Dies kann mit einer geringeren Kompression, aufgrund der Kanalöffnung, durch den Kanal begründet werden. An den Kanalrändern kommt es aufgrund der Vakuumfolienabspannung zur Aufwölbung. Es bleiben, wie Abb. 5.2 zeigt, sogar Abdrücke bei der Verwendung von Kanälen die auf Lochblechen positioniert sind und mit Fließhilfe kombiniert werden zurück.

Für die Untersuchung der Kanalabdrücke werden verschiedene Laminataufbauten und Faserhalbzeuge aus Kohlenstoff- und Glasfasern verwendet. Die Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Halbzeuge. Berücksichtigt werden Köper- und Leinwandgewebe sowie Biaxial- und Unidirektionalgelege. Hierbei sind die Flächengewichte der einzelnen Materialien als vergleichbar gewählt.

Zur Untersuchung etwaiger Kanalabdrücke wird für jedes Material die Dicke außerhalb und im Kanalbereich durch eine taktile Vermessung ermittelt. Die Mittelwertdifferenz dieser Messwerte gibt Aufschluß, ob es einen materialabhängigen Einfluß auf die Kanalabdrücke gibt. Um diese Ergebnisse statistisch abzusichern, wird auf die Mittelwertdifferenz ein Signifikanztest angewendet. Zusätzlich wird ein Toleranzbereich für die Dicken-schwankungen bestimmt und ein visueller Vergleich mit Hilfe von Schliffbilduntersuchungen durchgeführt.

Da die Faserdichte der Faserwerkstoffe und das Flächengewicht der Halbzeuge unterschiedlich sind, muss die jeweilige Lagenanzahl für das Erreichen einer mittleren Gesamtlaminatdicke  $\bar{t}$  von ca. 2,5 mm ( $\varphi_F \approx 50\%$ ) variiert werden. Dies ergibt sich aus der Gleichung 5.2. Hierbei ist  $q$  das Flächengewicht,  $\rho_F$  die Dichte des jeweiligen Faserwerkstoffs und  $\varphi_F$  der Faservolumengehalt.

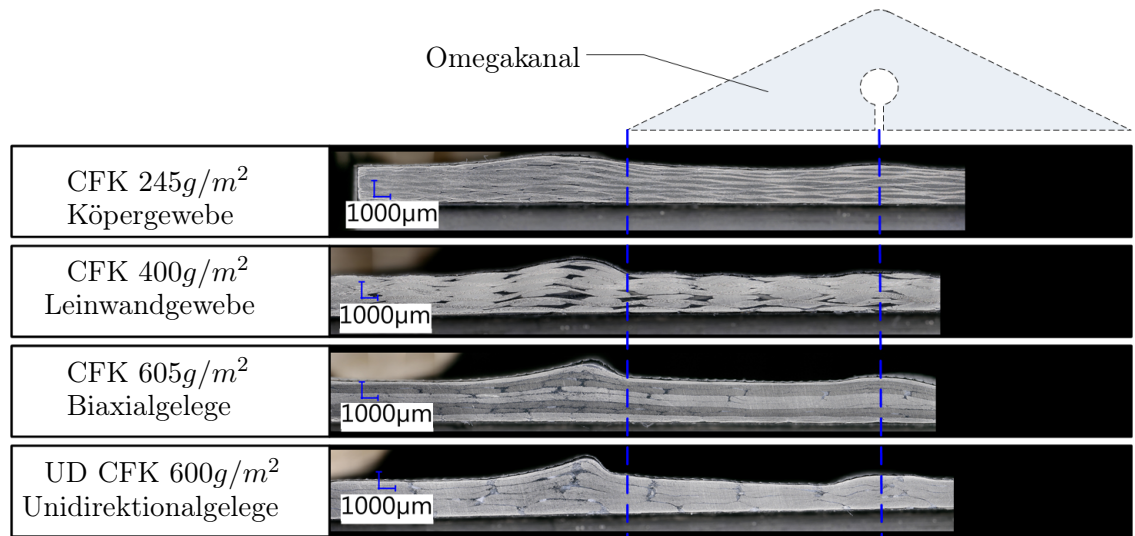


Abb. 5.1: Kanalabdrücke durch Omegakanal bei Körper-, Leinwandgewebe, Biaxial- und Unidirektionalgelege. Der Omegakanal bzw. dessen Bereich ist in grau angedeutet.

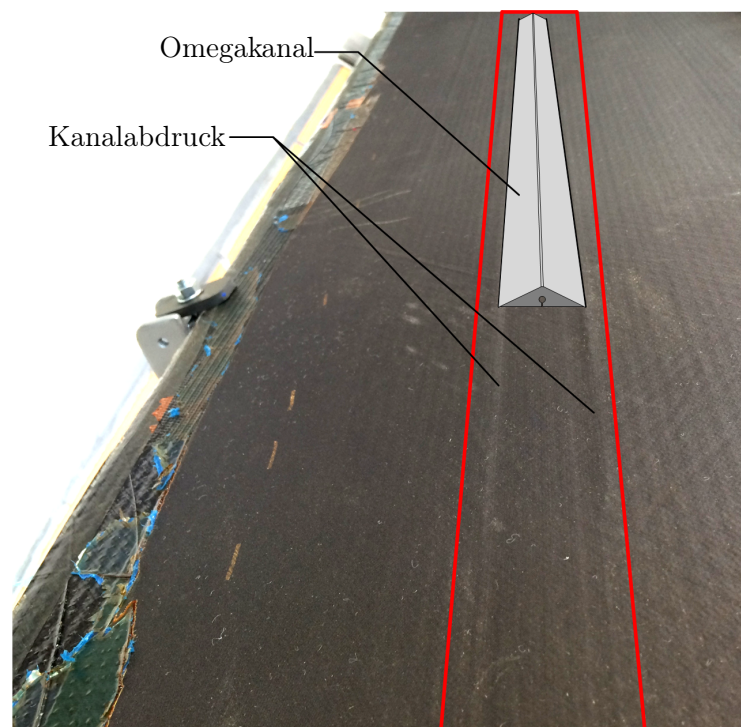


Abb. 5.2: Kanalabdruck hervorgerufen durch Kanäle, die auf gelochten Blechen positioniert sind und mit Fließhilfe kombiniert werden.

Tabelle 5.1: Verwendete Halbzeuge für die Untersuchung des Kanalabdrucks. Für die Dicke gilt der Faservolumengehalt  $\varphi_F = 50\%$ .

Köpergewebe				
Bezeichnung	Lagenaufbau	Lagenanzahl n	Dicke $\bar{t}$	Handelsname
CFK 245 $g/m^2$	$[0/90]_s$	10	2,75 mm	HP-T240C
CFK 245 $g/m^2$ bebindert	$[0/90]_s$	10	2,75 mm	HP-T240CE
CFK 160 $g/m^2$	$[0/90]_s$	14	2,52 mm	HP-T160C
GFK 166 $g/m^2$	$[0/90]_s$	20	2,55 mm	HP-T163E
Leinwandgewebe				
CFK 400 $g/m^2$	$[0/90]_s$	6	2,70 mm	HP-P400C
GFK 400 $g/m^2$	$[0/90]_s$	8	2,46 mm	HP-P401E
Biaxialgelege				
CFK 410 $g/m^2$	$[+45/-45]_s$	6	2,76 mm	HP-B415C
GFK 407 $g/m^2$	$[+45/-45]_s$	8	2,51 mm	EBX-0407-FM1270
CFK 605 $g/m^2$	$[+45/-45]_s$	4	2,72 mm	HP-B600C
GFK 606 $g/m^2$	$[+45/-45]_s$	6	2,80 mm	HP-B600E
Unidirektionalgelege				
UD CFK 600 $g/m^2$	$[0]_s$	4	2,70 mm	KUD-0600-T1270
GFK 597 $g/m^2$	$[0]_s$	6	2,76 mm	EUD-0597-T1270

$$\bar{t} = \frac{\sum q}{\rho_F \cdot \varphi_F} \quad (5.1)$$

$$\bar{t} = \frac{n \cdot q}{\rho_F \cdot \varphi_F} \quad (5.2)$$

Für die Versuchsdurchführung werden die Lagenzuschnitte entsprechend ihrer Lagenanzahl n in einer Größe von 250 mm x 200 mm auf einem Plattenwerkzeug aufgeschichtet. Anschließend wird der Aufbau mit einer Vakuumfolie luftdicht verschlossen. In der Mitte des Fasermaterials wird der Harzverteilungskanal positioniert und mit Klebeband abgedichtet. Der Kanal besitzt zwei Vakuuman schlüsse, von denen einer mit der Vakuumpumpe und der andere mit einem Drucksensor verbunden wird (siehe Anhang Abb. D.1). Es werden immer drei Proben in einem Vakuumaufbau gleichzeitig gefertigt, wobei die Position (vorne, mitte, hinten) jeweils variiert wird. Somit liegt jedes Faserhalbzeug einmal an jeder Position in Kanalrichtung. Die 0° Orientierung ist in Kanallängsrichtung. Als Kanal wird der in der Abb. 3.12 vorgestellte Kanal verwendet.

Bei der Versuchsdurchführung wird der Kanal gleichzeitig mit der Öffnung des Harzzugangs evakuiert. Hierdurch wird sichergestellt, dass das Fasermaterial nicht schon vor der Infusion deformiert wird. Sobald das gesamte Fasermaterial durchtränkt ist, wird im Kanal ein Druckausgleich hergestellt.

Die Spülkavitäten werden verschlossen, wenn diese vollständig mit Harz gefüllt sind. Zuletzt wird der Harzzugang verschlossen. Das Volumen der Spülkavität ist größer als das Volumen des Kanals und somit wird sichergestellt, dass das überschüssige Harz aus dem Kanal abfließen kann.

### 5.1 Taktile Dickenvermessung

Um eine quantitative Aussage über den Einfluss der Kanäle des Vakuumdifferenzdruckverfahrens auf die Fasermaterialien zu erhalten, werden die Probendicken der ausgehärteten Lamine mit einem Dickenprüfgerät (elektronischer Außenschnelltaster C3R30 der Firma Kroeplin) taktil vermessen und eine Auswertung von Schliffbildern aus dem Kanalbereich vorgenommen.

In den Abb.en 5.3, 5.4, 5.5 und 5.6 sind die gemittelten Dicken der taktilen Dickenvermessung für die Proben aus Köpergewebe, Biaxialgelege, Leinwandgewebe und Unidirektionalgelege dargestellt. Es werden jeweils die Messwerte des ungestörten Laminatbereichs (links in hellblau) mit den Messwerten des Kanals (rechts in dunkelblau) verglichen. Für jedes Material sind drei Proben angefertigt worden. Zusätzlich ist der Faservolumengehalt aus der Dickenmessung für das Laminat außerhalb des Kanalbereichs ermittelt worden und in Prozent dargestellt.

Der untere Bildbereich der Abb.en 5.3, 5.4, 5.5 und 5.6 zeigt die Dickendifferenz zwischen ungestörtem Laminat und Kanalbereich. Diese Dickendifferenz wird durch die Gleichung 5.3 bestimmt. Daher ist bei einer negativen Differenz  $\Delta t_{FK}$  der Mittelwert der Kanaldicke  $\bar{t}_{FK}$  größer als der Mittelwert der Laminatdicke  $\bar{t}_F$ .

$$\Delta t_{FK} = \bar{t}_F - \bar{t}_{FK} \quad (5.3)$$

Beim CFK 245 g/m<sup>2</sup> Köpergewebe gibt es eine deutliche Abhängigkeit von der Positionierung des Faserhalbzeugs. Dies wird durch den Dickenunterschied der einzelnen Proben deutlich. Die Probe, die vorne am Anguss positioniert worden ist, ist wesentlich dicker als die Probe am Ende des Kanals. Dies kann mit dem Relaxationsverhalten des Materials begründet werden. Im vorderen Bereich des Versuchsaufbaus findet der Druckausgleich eher statt als im hinteren Bereich. Dadurch entspannen sich die Fasern im vorderen Bereich eher als im hinteren Bereich. Allerdings werden hier die Ergebnisse zwischen Laminatdicke und Kanallaminatdicke relativ mit einander verglichen und daher hat dieses Verhalten keine Auswirkung auf die Dickendifferenz. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch beim Leinwandgewebe CFK 400g/m<sup>2</sup>. Die große Schwankung des Faservolumengehalts des Unidirektionalgeleges CFK 600g/m<sup>2</sup> ist hingegen auf eine größere Schwankung



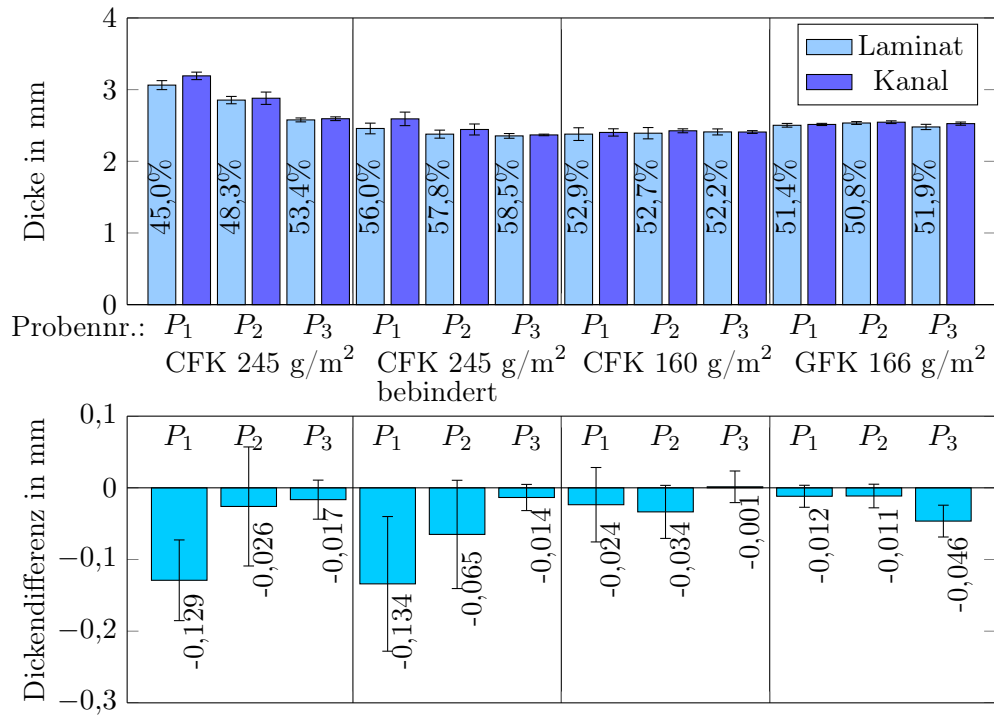


Abb. 5.3: Oben: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Dicken zwischen dem ungestörten Laminatbereich (jeweils linker Balken in hellblau) und dem Kanalbereich (jeweils rechter Balken in dunkelblau) der Platten aus **Köpergewebe**. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Unten: Dickendifferenz  $\Delta t_{FK}$  der Mittelwerte für jede Platte. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall.

Tabelle 5.2: Ermittelte Flächengewichte für Unidirektionalgelege CFK 600 g/m<sup>2</sup>

Probennummer	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Flächengewicht	572 g/m <sup>2</sup>	590 g/m <sup>2</sup>	623 g/m <sup>2</sup>

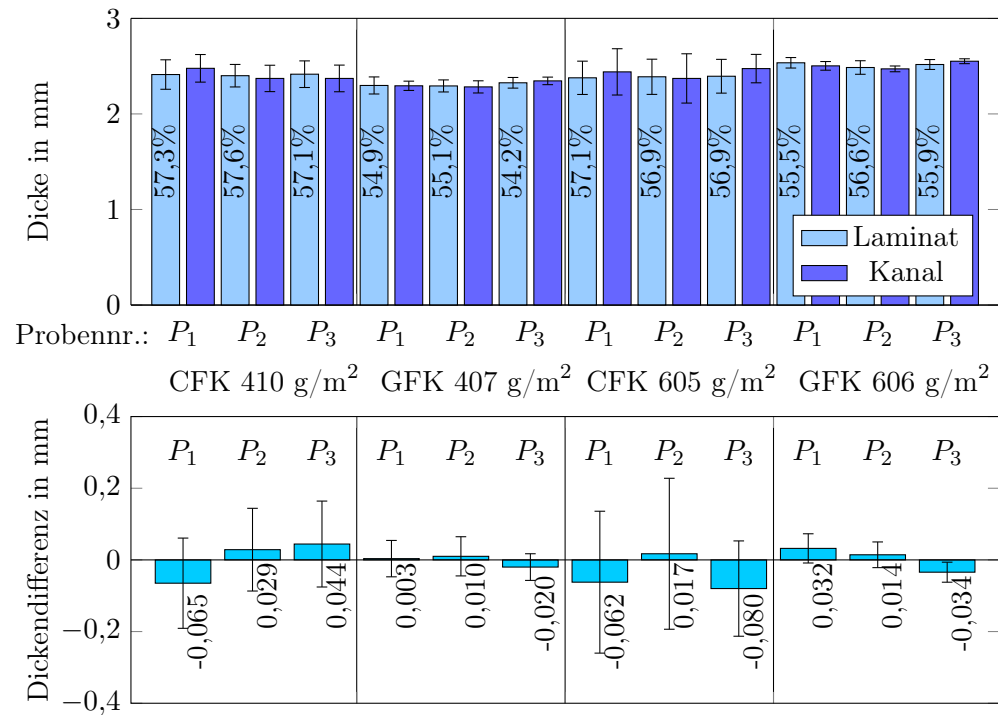


Abb. 5.4: Oben: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Dicken zwischen dem ungestörten Laminatbereich (jeweils linker Balken in hellblau) und dem Kanalbereich (jeweils rechter Balken in dunkelblau) der Platten aus **Biaxialgelege**. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Unten: Dickendifferenz  $\Delta t_{FK}$  der Mittelwerte für jede Platte. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall.

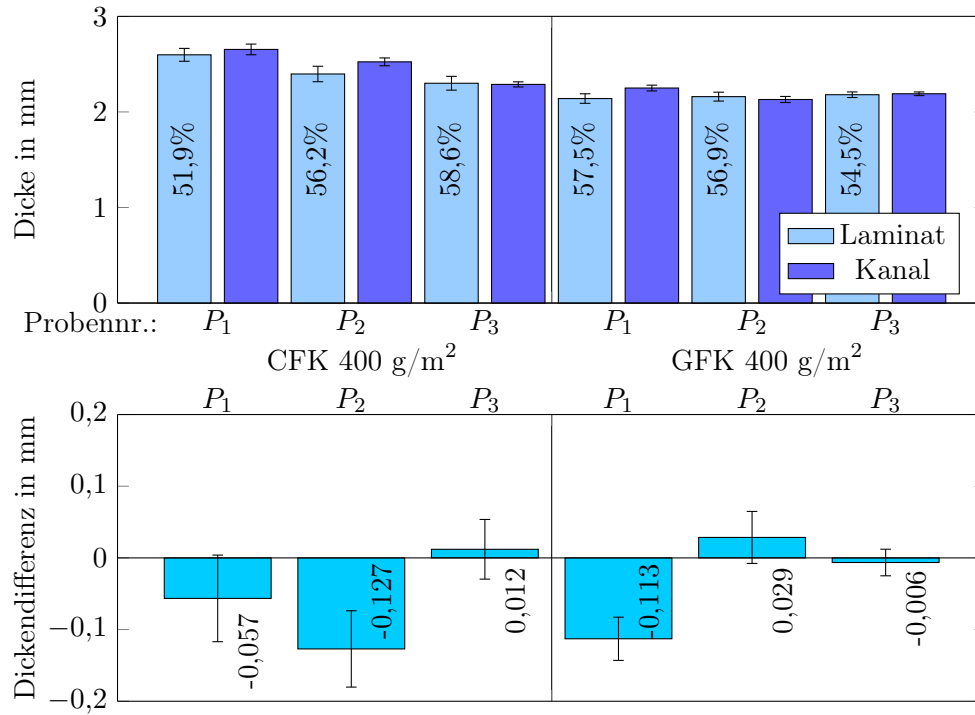


Abb. 5.5: Oben: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Dicken zwischen dem ungestörten Laminatbereich (jeweils linker Balken in hellblau) und dem Kanalbereich (jeweils rechter Balken in dunkelblau) der Platten aus **Leinwandgewebe**. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Unten: Dickendifferenz  $\Delta t_{FK}$  der Mittelwerte für jede Platte. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall.

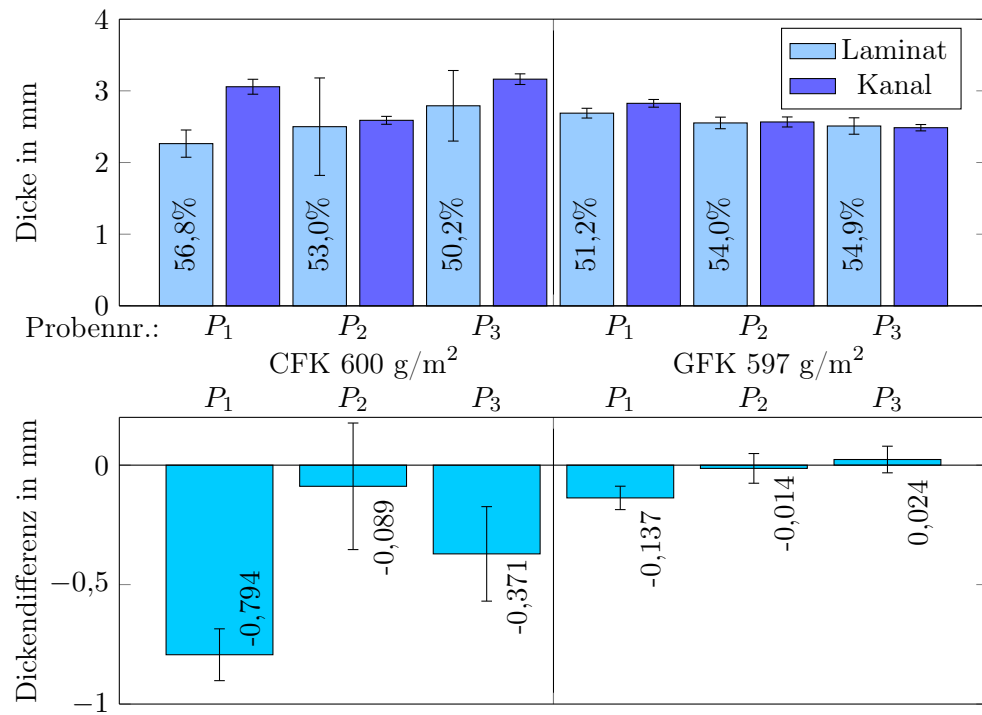


Abb. 5.6: Oben: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Dicken zwischen dem ungestörten Laminatbereich (jeweils linker Balken in hellblau) und dem Kanalbereich (jeweils rechter Balken in dunkelblau) der Platten aus **Unidirektionalgelege**. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Unten: Dickendifferenz  $\Delta t_{FK}$  der Mittelwerte für jede Platte. Die Fehlerbalken zeigen das 95% Konfidenzintervall.

Tabelle 5.3: Anzahl der Messwerte (t-Wert aus [49]).

Laminatbereich	Kanalbereich	Material	kritischer t-Wert ( $\alpha/2 = 0,025$ )
$n_F = 20$	$n_K = 5$	CFK 245 $g/m^2$ , CFK 245 $g/m^2$ bebindert, CFK 400 $g/m^2$	2,069
$n_F = 21$	$n_K = 7$	GFK 400 $g/m$ Probe $P_2$	2,056
$n_F = 28$	$n_K = 7$	übrige Proben	2,035

im Flächengewicht zurückzuführen. Durch das Abwiegen der Faserzuschnitte vor der Infusion, sind die in Tabelle 5.2 gezeigten tatsächlichen Flächengewichte für das Unidirektionalelege CFK 600  $g/m^2$  ermittelt worden. Bei den übrigen Fasermaterialien stimmen die Flächengewichte mit den nominellen Herstellerangaben in guter Näherung überein.

Bedingt durch den großen Flächenunterschied zwischen Kanal- und Laminatbereich, sind im Kanalbereich weniger Dickenmesspunkte vorhanden (siehe Abb. D.4 im Anhang). Daher werden immer Mittelwerte mit unterschiedlichen Anzahlen an Messpunkten miteinander verglichen. Dies macht es notwendig, einen Signifikanztest für die Mittelwertdifferenz  $\Delta t_{FK}$  anzuwenden.

Als statistisches Hilfsmittel bietet sich hierfür das Konfidenzintervall für eine Mittelwertsdifferenz an. Gegenüber den üblichen Verfahren, wie zum Beispiel ein t-Test, kann sehr anschaulich eine Signifikanz dargestellt werden. Nach [49] wird hierfür der t-Wert  $t_{\alpha/2}$  und der Standardfehler  $SE_{MW}$  der Mittelwertdifferenz benötigt.

$$\text{untere Grenze : } \Delta t_{FK} - t_{\alpha/2} \cdot SE_{MW} \quad (5.4)$$

$$\text{obere Grenze : } \Delta t_{FK} + t_{\alpha/2} \cdot SE_{MW} \quad (5.5)$$

Der Standardfehler  $SE_{MW}$  der Mittelwertsdifferenz ergibt sich aus den Standardfehlern für den Kanalbereich  $SE_K$  und dem Laminatbereich  $SE_F$ .

$$SE_{MW} = \sqrt{\frac{SE_F^2}{n_F} + \frac{SE_K^2}{n_K}} \quad (5.6)$$

Die Anzahl der Messwerte  $n$ , aus denen der jeweilige Mittelwert gebildet wird, ist in Tabelle 5.3 gezeigt. Durch zum Teil unterschiedlich große Probengeometrie ist die Anzahl der Messwerte angepasst worden.

Der benötigte t-Wert  $t_{\alpha/2}$  ist abhängig von der Fehlerwahrscheinlichkeit  $\alpha$  und der Anzahl der Freiheitsgrade  $df$ , die sich aus

$$df = n_K + n_F - 2 \quad (5.7)$$

bestimmen. Mit den entsprechend bestimmten Werten kann aus einer t- Verteilungstabelle, zum Beispiel Tabelle B in [49], der t-Wert abgelesen werden. Hier wird das 95% Konfidenzintervall verwendet, weshalb für  $\alpha/2 = 0,025$  gilt. Ist Null Inhalt des Konfidenzintervalls für Mittelwertdifferenzen, ist nach [49] ein entsprechender t-Test nicht signifikant. Dies wird mit der Möglichkeit begründet, dass die Mittelwertdifferenz in Wahrheit auch null werden kann. Im umgekehrten Fall kann behauptet werden, dass mit 95% Sicherheit die Mittelwertdifferenz nicht null ist. Im unteren Teil der jeweiligen Abb.en 5.3, 5.4, 5.5 und 5.6 ist das 95% Konfidenzintervall für Mittelwertdifferenzen als Fehlerbalken dargestellt.

Das Konfidenzintervall zeigt für jedes untersuchte Material zumindest einmal keine Signifikanz an. Allerdings ist dies nur eine statistische Aussage. Für eine praktische Relevanz sollen noch die Oberflächenwelligkeiten der Proben vermessen werden und damit die Mittelwertdifferenzen relativiert werden.

## 5.2 Analyse der Oberflächenwelligkeit

Da es sich bei dem untersuchten Verfahren um ein Vakuumsackverfahren handelt, bildet eine Vakuumfolie den flexiblen Formwerkzeugteil. Durch die Flexibilität der Vakuumfolie und durch die Flächengewichtstoleranz (bei den verwendeten Materialien  $\pm 5\%$ ) entstehen die Welligkeiten an der Oberfläche des Laminats. Außerdem zeigt die Abb. 5.7 zusätzlich, dass Welligkeiten durch die Stapelung der Einzelschichten hervorgerufen werden können. Im linken Bildteil der Abb. 5.7 liegen die Rovings der Einzelschichten versetzt zueinander, wohingegen im rechten Bildteil die Rovings direkt übereinander liegen. Hierdurch entstehen Dickenunterschiede. Durch Kombination der beiden Möglichkeiten entstehen die Welligkeiten an der Oberfläche des Laminats. Hervorgerufen werden die Dickenunterschiede durch Schwankungen im Flächengewicht, da sich durch den Herstellungs- und Handhabungsprozess der Halbzeuge zwischen den Fasern unterschiedlich große Abstände einstellen. Beim Schichten der Einzellagen zu einer Preform führt der Lagenversatz zwischen den einzelnen Lagen zu Bereichen an denen Faserstränge übereinander liegen oder versetzt zueinander angeordnet sind. Zudem besitzen die Einzellagen, vor allem bei den Gewebelhalbzeuge, Kreuzungspunkte und Abstände zwischen den Kreuzungspunkten (Flottierung). Durch das Schichten und Komprimieren der Einzellagen, können sich die Faserstränge einer Einzellage in den Bereich zwischen den Kreuzungspunkten ableiten. An diesen Stellen ist das Laminat lokal dünner als an den Stellen an denen sich Kreuzungspunkte überlagern.

Mit Hilfe eines digitalen Mikroskops ist es möglich, die Oberflächentopologie des Materials festzustellen. Bei diesem optischen Messverfahren wird durch die Tiefenschärfenautomatik die Höheninformation ermittelt. In der Abb. 5.8 ist als Beispiel die Ist- Oberfläche

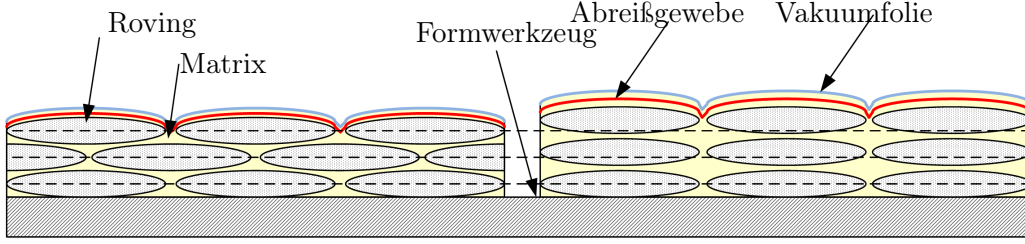


Abb. 5.7: Schematische Darstellung der Stapelung von Einzelschichten und daraus resultierende Welligkeiten.

eines Köpergewebes farblich dargestellt. Die zu bestimmende Welligkeit wird durch die Oberflächenrauheit, bedingt durch das Abreißgewebe, überlagert. Außerdem erfasst das Mikroskop auch Poren an der Laminatoberfläche und verfälscht damit die Messung der Oberflächentopologie.

In Anlehnung an [39] wird die Oberflächenwelligkeit aus dem Primärprofil durch eine Tiefpassfilterung nach Gauß ermittelt. Die Grenzwellenlänge  $\lambda_{co}$  trennt hierbei die Welligkeit und die Rauheit. Als Gewichtsfunktion  $s(x)$  wird die Gaußsche Dichtefunktion

$$s(x) = \frac{1}{\sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi} \lambda_{co}}} e^{-\pi \left( \frac{x}{\sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi} \lambda_{co}}} \right)^2} \quad (5.8)$$

angewendet. Die bei der Messung zu erwartenden Rauheiten liegen nach [63] im Bereich von  $R_z = 60 \mu m$  bis  $R_z = 90 \mu m$ . In Anlehnung an DIN EN ISO 4288:1998-04 [22] wird deshalb die Grenzwellenlänge  $\lambda_{co} = 8 mm$  gewählt. Durch die Filterung der Topologiedaten werden auch die Messfehler durch etwaige Oberflächenporen verringert.

Das Primärprofil  $P$ , wie in Abb. 5.9 (grüne Linie) beispielhaft gezeigt, wird über die Gesamtprobentiefe gemittelt. Durch Anwendung des Gaußfilters wird die im unteren Teil der Abb. 5.9 gezeigte Welligkeit  $W$  ermittelt. Die Wellentiefe  $\bar{W}_t$  ist als Abstand zwischen Minimum  $\bar{W}_{min}$  und Maximum  $\bar{W}_{max}$  der Welligkeit  $W$  definiert. In der Tabelle 5.4 sind die Werte der Welligkeit zusammengefasst.

Die Mittelwertdifferenz zwischen Laminat- und Kanalbereich darf innerhalb der Welligkeitstiefe schwanken, da

$$\Delta t_{FK} = [\bar{t}_F]_{-\bar{W}_{min}}^{+\bar{W}_{max}} - ([\bar{t}_K]_{-\bar{W}_{min}}^{+\bar{W}_{max}}) \quad (5.9)$$

gilt. Aus 5.9 folgt, dass für die obere und untere Grenze mit  $W_t = |W_{min}| + |W_{max}|$

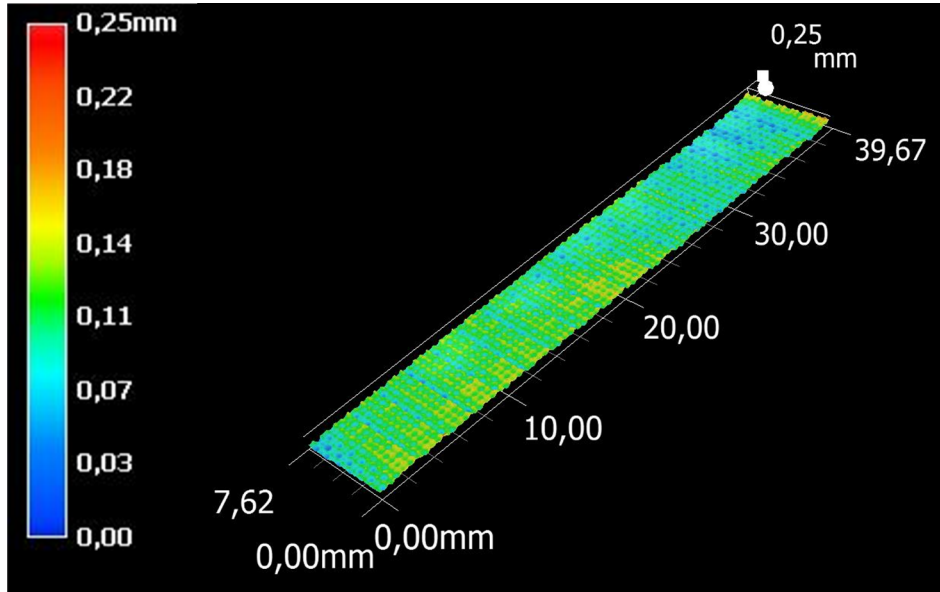


Abb. 5.8: Oberflächentopologie am Beispiel des Köpergewebes GFK 166  $g/m^2$ .

$$\text{obere Grenze : } \Delta t_{FK_{max}} = \Delta t_{FK} + \bar{W}_t \quad (5.10)$$

$$\text{untere Grenze : } \Delta t_{FK_{min}} = \Delta t_{FK} - \bar{W}_t \quad (5.11)$$

gelten muss. Die Mittelwertdifferenz darf damit innerhalb der Werte in Tabelle 5.4 schwanken. Werden diese Grenzen nicht überschritten, ist von keinem Einfluss des Kanals auszugehen. Die ermittelten Werte sind in diesem Zusammenhang nur als zusätzliche Bereichseinschätzung zu verstehen und dienen zur Überprüfung des statistischen Signifikanztests. Allerdings zeigt die Welligkeitsuntersuchung auch, dass bei höherer Standardabweichung auch höhere Welligkeitswerte vorliegen. Dies kann mit den größeren Unterschieden zwischen den einzelnen Dickenmesswerten und damit höherer Streuung bei größerer Welligkeit begründet werden.

Für die untersuchten Köpergewebe zeigt sich, dass alle Proben, die bei der statistischen Signifikanzuntersuchung keine Signifikanz gezeigt haben, auch innerhalb der Grenzen der Oberflächenwelligkeitswerte liegen. Der Einfluss eines Binders auf die Welligkeiten wird durch den Vergleich der Welligkeitswerte des Köpergewebes CFK 245  $g/m^2$  gezeigt. Beim unbedingten Material ist die Welligkeit deutlich geringer, da die einzelnen Lagen leichter aufeinander abgleiten können. Der große Unterschied der Welligkeitswerte zwischen CFK 160  $g/m^2$  und GFK 166  $g/m^2$  kann mit der unterschiedlichen Garnfeinheit der beiden Materialien begründet werden. Beim Kohlenstofffasergewebe beträgt die Garnfeinheit 200 Tex und beim Glasfasergewebe 68 Tex. Das Glasfasergewebe hat somit dünnere Kett- und Schußfäden, wodurch die Welligkeit jeder Einzellage geringer ist als



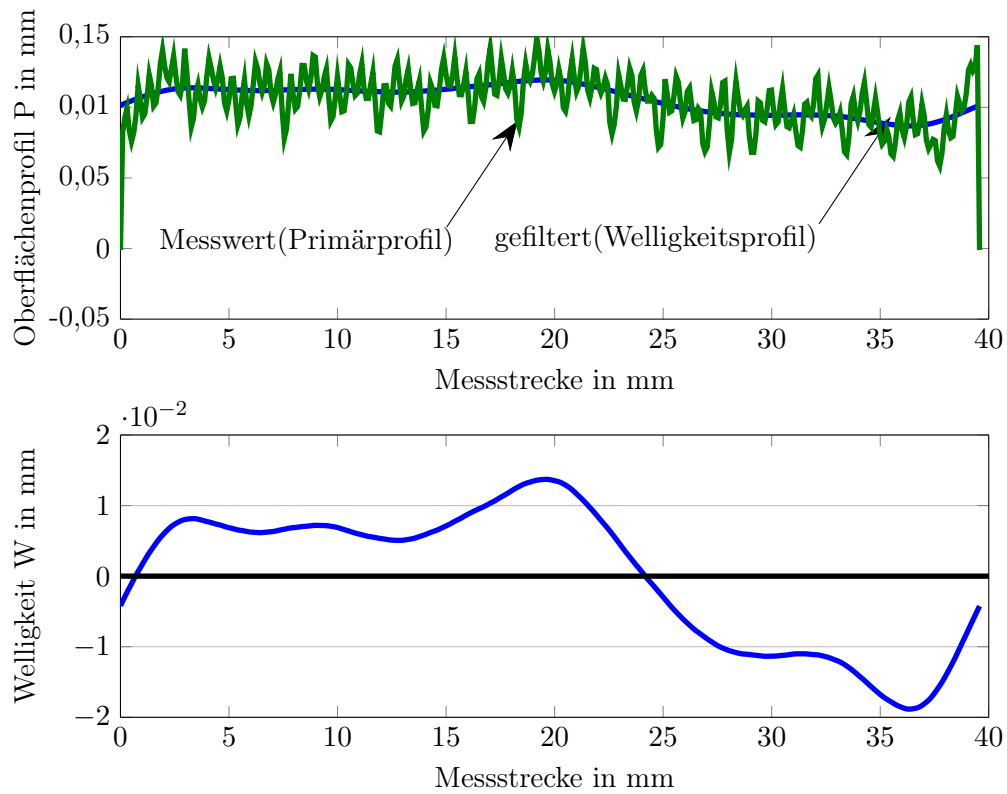


Abb. 5.9: oben: Über Probentiefe gemittelt Primärprofil (grüne Linie) unten: Welligkeit ermittelt durch Gaußfilter; für Köpergewebe GFK 166  $g/m^2$ .

Tabelle 5.4: Welligkeitswerte der untersuchten Fasermaterialien (Mittelwert aus jeweils 3 Proben, Standardabweichung in Klammern).

Bezeichnung	$\bar{W}_{min}$ in mm	$\bar{W}_{max}$ in mm	$\bar{W}_t$ in mm
Köpergewebe			
CFK 245 $g/m^2$	-0,0228	0,0247	0,0475 (0,01)
CFK 245 $g/m^2$ bebindert	-0,0379	0,0813	0,1193 (0,07)
CFK 160 $g/m^2$	-0,0545	0,0415	0,0961 (0,01)
GFK 166 $g/m^2$	-0,0140	0,0097	0,0237 (0,01)
Leinwandgewebe			
CFK 400 $g/m^2$	-0,1895	0,0542	0,2437 (0,14)
GFK 400 $g/m^2$	-0,0375	0,0435	0,0810 (0,03)
Biaxialgelege			
CFK 410 $g/m^2$	-0,1528	0,1994	0,3522 (0,14)
GFK 407 $g/m^2$	-0,0944	0,0722	0,1666 (0,06)
CFK 605 $g/m^2$	-0,1619	0,2307	0,3926 (0,15)
GFK 606 $g/m^2$	-0,0505	0,0560	0,1065 (0,04)
Unidirektionalgelege			
UD CFK 600 $g/m^2$	-0,1807	0,2954	0,4761 (0,29)
GFK 597 $g/m^2$	-0,0727	0,0673	0,1400 (0,03)

beim Kohlenstofffasergewebe. Dieser Unterschied in der Garnfeinheit tritt (aufgrund der Dichteunterschiede und vergleichbarer Flächengewichte) auch bei den übrigen Halbzeugen auf, weshalb die Welligkeit bei den Glasfaserhalbzeugen tendenziell geringer ausfällt.

Der Vergleich der Welligkeiten bei den Leinwandgeweben zeigt, dass alle Werte innerhalb des Toleranzbereichs liegen. Durch die geringere Flottierung und das höhere Flächengewicht, ist die Welligkeit gegenüber den Köpergeweben jedoch deutlich größer.

Bei den Biaxialgelegen liegen alle Mittelwertdifferenzen innerhalb des Oberflächenwelligkeitsbereichs. Die Probe  $P_3$  des Biaxialgeleges GFK 606  $g/m^2$  ist nach der Singinfikanzuntersuchung als signifikant einzuschätzen. Jedoch zeigt die Untersuchung der Oberflächenwelligkeit, dass die Welligkeit sehr viel größer ist.

Beim Unidirektionalgelege CFK 600  $g/m^2$  ist die Mittelwertdifferenz der Probe  $P_1$  außerhalb der Oberflächenwelligkeit. Die Proben  $P_2$  und  $P_3$  sind innerhalb der Welligkeitswerte. Ähnlich ist die Erkenntnis beim Unidirektionalgelege GFK 597  $g/m^2$ . Hier liegen ebenfalls die Proben  $P_2$  und  $P_3$  innerhalb der Welligkeitskennwerte.

Die Ergebnisse der Untersuchung der einzelnen Halbzeuge zeigen auch, dass das Verfahren weder bei Glasfaser- noch bei Kohlenstofffasermaterialien eine wesentliche Dickenänderung hervorruft. Trotz der unterschiedlichen Biegesteifigkeiten der Materialien bleiben keine Abdrücke auf dem Material zurück. Dies wird auch durch die verschiedenen Laminataufbauten deutlich. Selbst bei der Orientierung der Fasern in Kanalrichtung (Unidirektionalgelege), bei der nur eine geringe Biegesteifigkeit quer zur Faserorientierung

vorliegt, werden bei einem Großteil der Proben keine deutlichen Einflüsse des Verfahrens auf die Dicke erkennbar.

## 5.3 Visueller Vergleich durch eine Schliffbildanalyse

Für eine weitere Untersuchung etwaiger Kanalabdrücke wird ein visueller Vergleich zwischen Schliffbildern gemacht. Hierfür ist in den Abb.en 5.10, 5.12, 5.11 und 5.13 jeweils eine Schliffbildprobe aus dem Kanalbereich, eine Probe aus dem ungestörten Laminatbereich und eine Probe mit einem Omegakanalabdruck abgebildet.

Im Gegensatz zu den Proben, die mit einem Omegakanal hergestellt worden sind, sind im Kanalbereich des neuen Verfahrens keine Faserondulationen oder Reinharzansammlungen zu erkennen. Des Weiteren sind keine Unterschiede zwischen ungestörtem Laminatbereich und Kanalbereich des neuen Verfahrens feststellbar. Allerdings fällt beim Vergleich des Unidirektionalgeleges CFK 600  $g/m^2$  die geringere Oberflächenwelligkeit im Kanalbereich auf (Abb. 5.13). Vermutlich führt das Belasten des Fasermaterials im imprägnierten Zustand zu einer verbesserten Stapelung der Fasern, da die Gleitreibung durch das Harz verringert wird.[34]

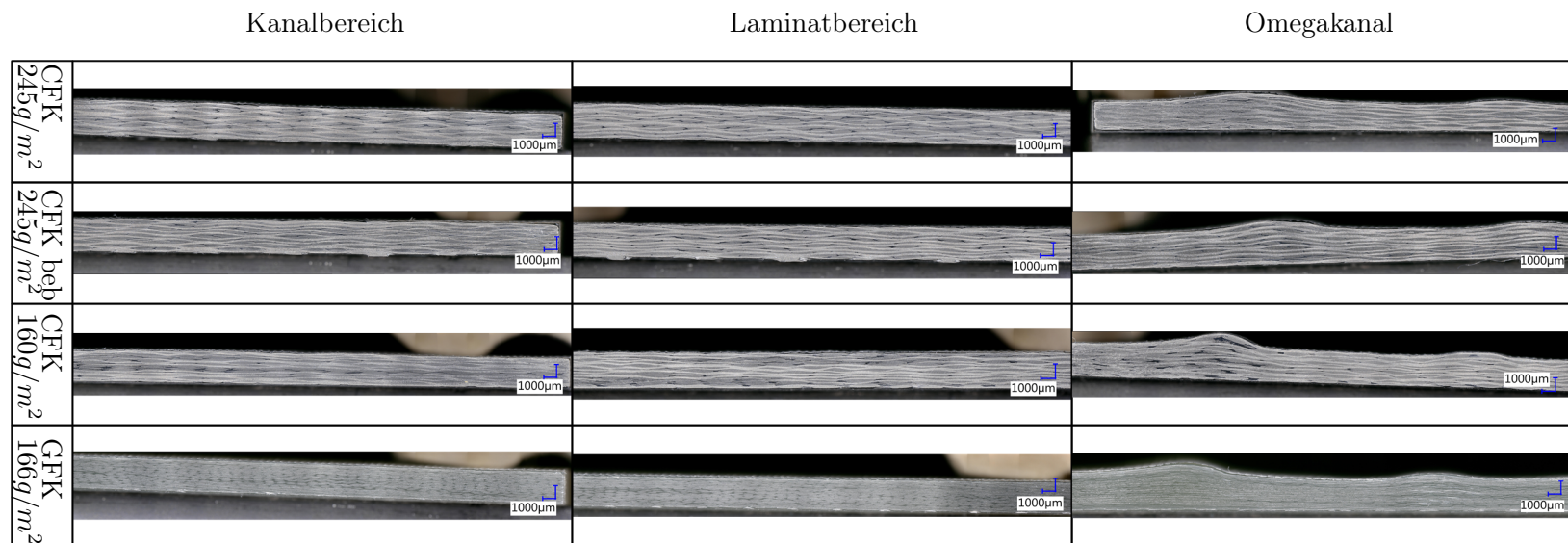


Abb. 5.10: Schliffbilder Köpergewebe

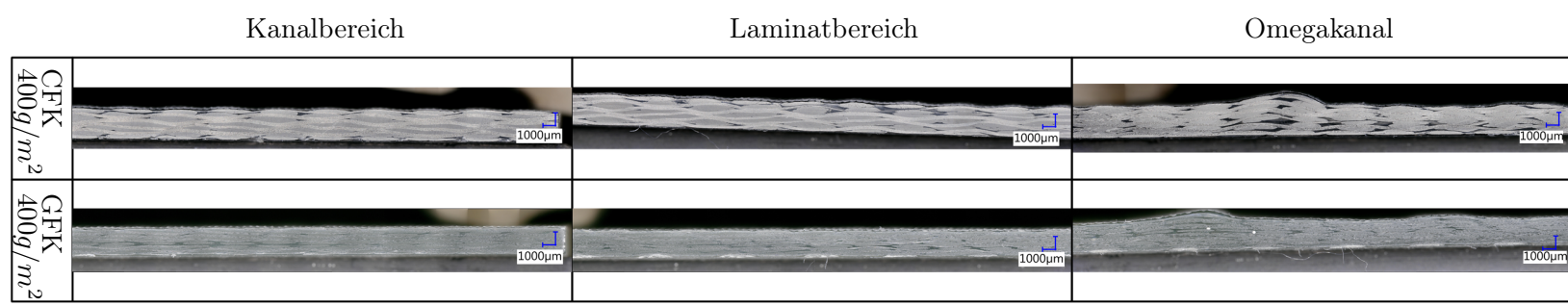


Abb. 5.11: Schliffbilder Leinwandgewebe

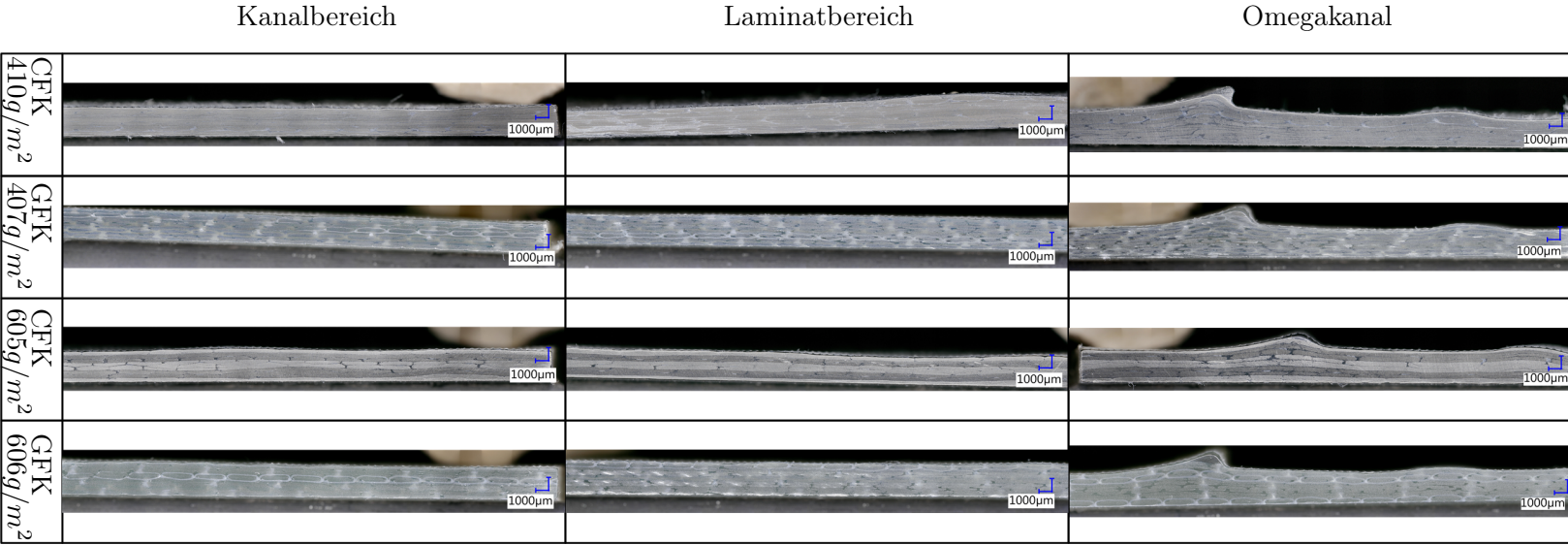


Abb. 5.12: Schliffbilder Biaxialgelege

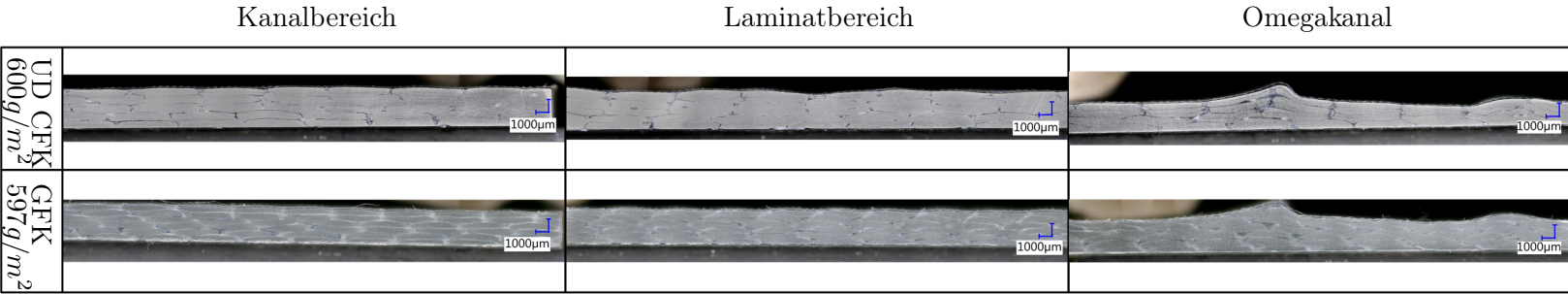


Abb. 5.13: Schliffbilder Unidirektionalgelege

5.3 Visueller Vergleich durch eine Schliffbildanalyse

## 5.4 Zusammenfassung der Resultate der Einzeluntersuchungen

Alle drei Untersuchungsmethoden zeigen, dass es bei der Verwendung der neuartigen Kanäle keine oder nur marginale Unterschiede zwischen ungestörtem Laminatbereich und Kanalbereich gibt. Beim Unidirektionalgelege CFK 600  $g/m^2$  zeigt die statistische Signifikanzuntersuchung zwar eine Signifikanz bei zwei von drei Proben, allerdings liegt die Probe  $P_3$  innerhalb der Welligkeit und auch die Schliffbilduntersuchung zeigt keinen signifikanten Einfluß der Kanäle.

Bei allen anderen Materialien sind immer mindestens zwei von drei Proben als statistisch nicht signifikant anzusehen und auch die Welligkeits- und die Schliffbilduntersuchungen zeigen dieses Ergebnis. Dies bedeutet, dass die neuartigen Kanäle bei über der Hälfte der Proben der jeweiligen Halbzeuge keine Kanalabdrücke zurücklassen.

Im Vergleich zu den Omegaprofilkanälen treten bei den Kanälen des neuen Verfahrens keine Faserondulationen und Reinharzansammlungen im Kanalbereich auf. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Kanäle keinen Abdruck hinterlassen und eine Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik darstellen.

Die Arbeitshypothese II

“Wenn die Harzverteilungskanäle innerhalb eines Prozessfensters, das durch Faserpermeabilität und Harzviskosität dominiert wird, durch Auflösen des Differenzdrucks deaktiviert werden, hinterlassen die Kanäle keine Abdrücke auf dem Laminat.”

kann zumindest für die untersuchten Faserhalbzeuge und Laminataufbauten als bestätigt betrachtet werden.

Der Vorteil der rückstandsfreien Auflösung der Kanäle ist somit gegeben und die Kanäle können auch direkt auf der Bauteiloberfläche verwendet werden. Da es nachweislich keine Kanalabdrücke gibt, kann das Verfahren sogar in Bereichen mit Funktionsflächen, wie zum Beispiel Fügeflächen, angewendet werden.

## 6 Anwendung des Verfahrens

### 6.1 Prozessfenster zur Auflösung des Kanals

Die Arbeitshypothese III besagt, dass es ein Prozessfenster gibt, in dem die Kanäle aufgelöst werden können und das überschüssige Harz abgeführt werden kann. In Bezug auf das Prozessfenster ist es besonders interessant, in welcher Zeitspanne die Auflösung des Kanals stattfinden muss, ohne Harzrückstände zu hinterlassen. Für die Abschätzung der Zeitspanne dient ein Analogiemodell aus der Fluidmechanik, bei dem ein Behälter über eine Öffnung entleert wird. In der Abb. 6.1 ist das Modell dargestellt. Gesucht ist hierbei die benötigte Zeit, um den Behälter vollständig zu entleeren. [30]

Es werden folgende Annahmen getroffen:

- bogenförmiger Kanalquerschnitt wird als rechteckiger Querschnitt angenommen
- größere Laminatdicke und damit geringerer Faservolumengehalt im Kanalbereich nicht berücksichtigt
- Harz fließt nur quer zur Kanalrichtung ab
- Harzangusspunkt ist verschlossen

Obwohl die Füllhöhe im Behälter nicht konstant ist, kann die Strömung als stationär betrachtet werden. Dies wird nach [30] mit der geringeren Absinkgeschwindigkeit  $v_{SK}$  gegenüber der Austrittsgeschwindigkeit  $v_D$  begründet.

Mit den genannten Annahmen lässt sich das Problem durch die Kontinuitätsgleichung 6.1 beschreiben.

$$v_{SK}A_{SK} = v_{Darcy}A_F \quad (6.1)$$

Das Produkt aus Sinkgeschwindigkeit  $v_{SK}$  und Kanaloberfläche  $A_{SK} = 2aL_K$  muss dem Produkt aus Austrittsgeschwindigkeit  $v_{Darcy}$  und Fasermaterialquerschnittsfläche  $A_F = t_FL_K$  gleich sein. Durch Einführen des Volumenstroms  $\dot{V} = v_{SK}A_{SK}$  folgt für 6.1:

## 6 Anwendung des Verfahrens

eigentliche Kanalgeometrie

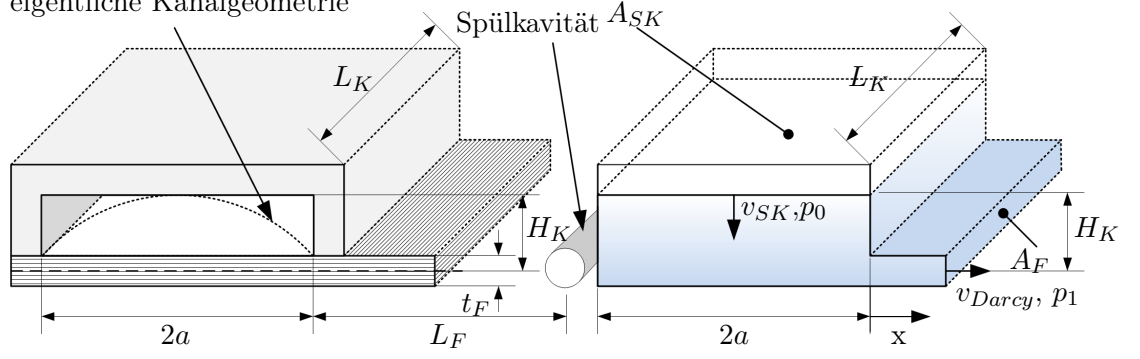


Abb. 6.1: Schematische Darstellung des Analogiemodells zur Abschätzung der Entleerungszeitspanne des Kanals. Das Analogiemodell aus der Fluidmechanik ist ein Behälter der durch eine Öffnung am Bodenrand entleert wird.

$$\dot{V} = v_{Darcy} A_F \quad (6.2)$$

$$\frac{dV}{d\tau} = v_{Darcy} A_F \quad (6.3)$$

Die Austrittsgeschwindigkeit  $v_{Darcy}$  ist hierbei die Fließgeschwindigkeit nach Darcy und lautet:

$$v_{Darcy} = -\frac{K}{\mu(\tau)(1 - \varphi_F)} \nabla p \quad (6.4)$$

Die Permeabilität  $K$ , der Druckgradient  $\nabla p = \frac{dp}{dx}$  und der Faservolumengehalt  $\varphi_F$  werden als konstant und die Viskosität in diesem Fall als zeitabhängig betrachtet. Nach Ehrenstein [23] hat die Viskosität bei einer isothermen Härtung einen exponentiellen Verlauf und daher wird für den zeitabhängigen Viskositätsverlauf der folgende Ansatz 6.5 gewählt.

$$\mu(\tau) = c_a e^{c_b \tau} \quad (6.5)$$

Dies in 6.3 eingesetzt und nach Variablen getrennt liefert:

$$dV = -\frac{K}{c_a e^{c_b \tau} (1 - \varphi_F)} \nabla p A_F d\tau \quad (6.6)$$

$$\int_0^V dV = -\int_{\tau_A}^{\tau_E} \frac{K}{c_a e^{c_b \tau} (1 - \varphi_F)} \nabla p A_F d\tau \quad (6.7)$$



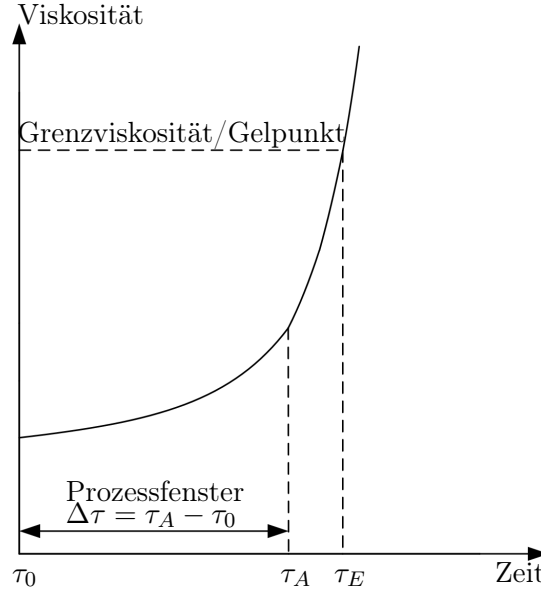


Abb. 6.2: Schematische Darstellung des Viskositätsverlaufs bei einem isothermen Prozess mit Grenzviskosität bzw. Gelpunkt.  $\Delta\tau$  beschreibt den Zeitraum für das Prozessfenster und  $\tau_A$  ist der späteste Zeitpunkt zum Belüften des Kanals.  $\tau_E$  gibt den Gelzeitpunkt bzw. das Erreichen der Grenzviskosität an.

Die Integration führt damit zu:

$$V = \frac{\nabla p A_F K}{c_b c_a (1 - \varphi_F)} [e^{-c_b \tau_A} - e^{-c_b \tau_E}] \quad (6.8)$$

Gesucht ist die Anfangszeit  $\tau_A$ , also der Zeitpunkt an dem der Kanal spätestens bedruckt werden muss, um das Harz rechtzeitig vor Ablauf der Endzeit  $\tau_E$  abzuführen. Der Endzeitpunkt  $\tau_E$  kann hierbei zum Beispiel das Erreichen der Grenzviskosität oder des Gelpunkts beschreiben (Abb. 6.2).

$$\tau_A = -\frac{1}{c_b} \left[ \ln(e^{-c_b \tau_E} - \frac{A_{SK}(H_K - \frac{t_F}{2}) c_b c_a (1 - \varphi_F) L_F}{(p_1 - p_0) A_F K}) \right] \quad (6.9)$$

$$\tau_A = -\frac{1}{c_b} \left[ \ln(e^{-c_b \tau_E} - \frac{2a (H_K - \frac{t_F}{2}) c_b c_a (1 - \varphi_F) L_F}{(p_1 - p_0) t_F K}) \right] \quad (6.10)$$

mit  $\nabla p = \frac{dp}{dx} = \frac{p_1 - p_0}{L_F}$ ,  $A_{SK} = 2aL_K$  und  $A_F = t_F L_K$ . Die Länge  $L_F$  gibt hierbei den Abstand zwischen Kanalrand und Kavität an.

In der Abb. 6.3 ist der isotherme Viskositätsverlauf eines Epoxidharzes dargestellt und die Anfangszeit zum Belüften des Kanals in Abhängigkeit des Abstands zur Spülkavität  $L_F$  gezeigt. Der gezeigte Viskositätsverlauf der Harz/Härter Mischung Sicomin SR8100/SD8822 kann, mit  $c_a = 36,165 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  und  $c_b = 1,01 \text{ 1/s}$ , durch den Ansatz Gleichung 6.5 approximiert werden.

Die Abb. 6.3 zeigt, dass bei einem Fließweg  $L_F = 0 \text{ m}$  der Startzeitpunkt  $\tau_A$  dem Endzeitpunkt  $\tau_E$  entspricht. Bei den gewählten Parametern entspricht dies dem maximalen Prozessfenster. Je größer die Distanz von Kanal und Spülkavität ist, desto eher muss der Kanal belüftet werden, um das Harz aus dem Kanalbereich abzuführen. Aus diesem Grund verkürzt sich das Prozessfenster

$$\Delta\tau = \tau_A - \tau_0, \quad (6.11)$$

wenn der Abstand zwischen Angusskanal und Spülkavität vergrößert wird. Bei einem variothermen Prozess muss zunächst ein Ansatz für den Viskositätsverlauf, wie in Abb. 2.13 (Kapitel 2) gezeigt, gefunden werden. Mit diesem Ansatz kann dann die Gleichung 6.7 gelöst werden.

Mit dem gewählten Ansatz ist es möglich, das Prozessfenster in Bezug auf das Abfließen des Harzes zu bestimmen. Allerdings ist hierbei nicht das Setzungsverhalten des Fasermaterials und die Abhängigkeit der Permeabilität vom Faservolumengehalt berücksichtigt worden. Nach [56] zeigt das Setzen des Fasermaterials ebenfalls eine Abhängigkeit von der Zeit. Es ist in zwei verschiedenen Experimenten die Dickenänderung an mehreren Positionen nach der vollständigen Imprägnierung des Fasermaterials untersucht worden. Im Unterschied zum ersten Experiment wird beim zweiten der Zugang zum Harzreservoir nach vollständiger Tränkung der Preform verschlossen. Der Druckausgleich und die Dickenänderung des Laminats im ersten Versuch dauern wesentlich länger als beim zweiten Laminat. Als Resultat ist der Faservolumengehalt im ersten Experiment signifikant niedriger als im zweiten.

Für das Prozessfenster bedeutet das beschriebene Verhalten, dass das Setzungsverhalten zwar von der Zeit abhängt, dies aber das gesamte Laminat betrifft. Durch das Abfließen des Harzes aus dem Kanalbereich bildet sich ein Druckausgleich innerhalb der Kavität aus und daher muss sich die Laminatdicke im Kanalbereich auf den entsprechenden Wert zurückbilden. Voraussetzung hierfür ist immer, dass das Harz aus dem Kanalbereich rechtzeitig abfließen kann. Dickenunterschiede können dennoch entstehen, da durch den geringeren Umgebungsdruck vor der Infusion das Fasermaterial im Kanalbereich dekomprimieren kann und somit vor Infusionsbeginn einen höheren Dickenstartwert besitzt. Die Untersuchungen im Kapitel 5 zeigen aber, dass diese Dickenunterschiede meist unterhalb der Dickentoleranz, also innerhalb der Oberflächenwelligkeiten, liegen.

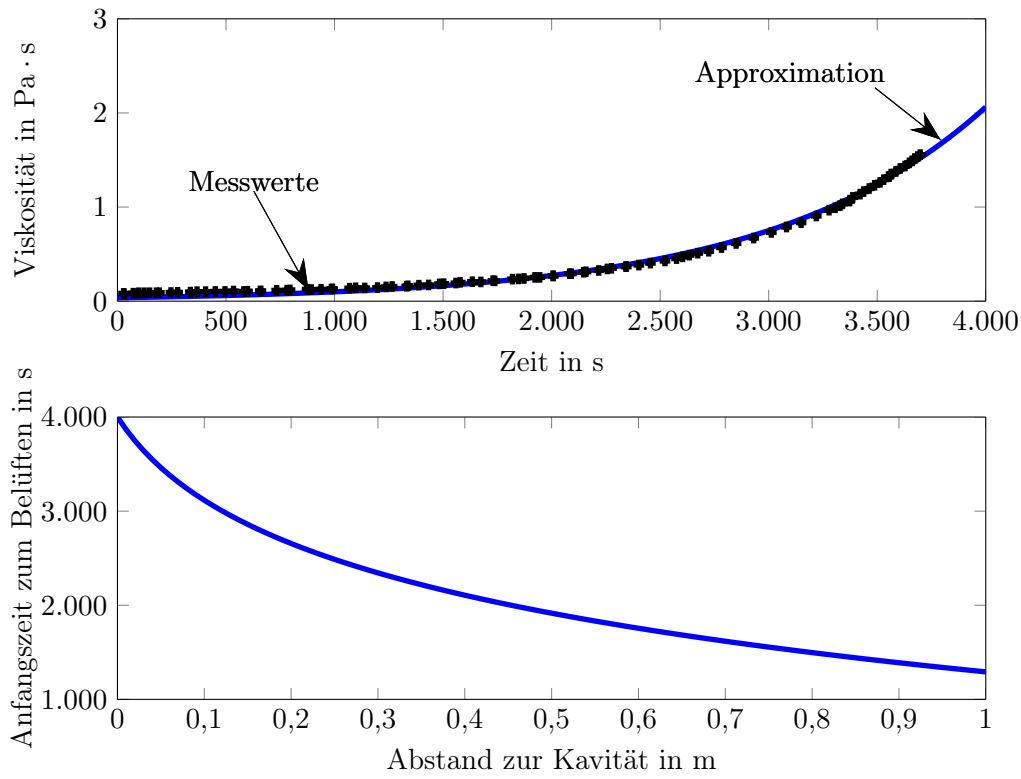


Abb. 6.3: oben: Viskositätsverlauf (Sicommin SR8100/SD8822 isotherm bei 50°C) mit  $c_a = 36,165 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,  $c_b = 1,01 \text{ 1/s}$  Residuum  $R=0,998$ ; unten: Anfangszeitpunkt zum Belüften  $\tau_A$  in Abhängigkeit des Fließwegs bis zur Spülkavität  $L_F$  mit  $\varphi_F = 0,5$ ,  $2a = 30 \text{ mm}$ ,  $H_K = 2,7 \text{ mm}$ ,  $t_F = 2 \text{ mm}$ ,  $p_0 = 0,1 \text{ MPa}$ ,  $p_1 = 0 \text{ MPa}$ ,  $\tau_E = 4000 \text{ s}$  und  $K = 1,84 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2$ . Je länger der Fließweg ist, desto eher muss der Kanal belüftet werden.

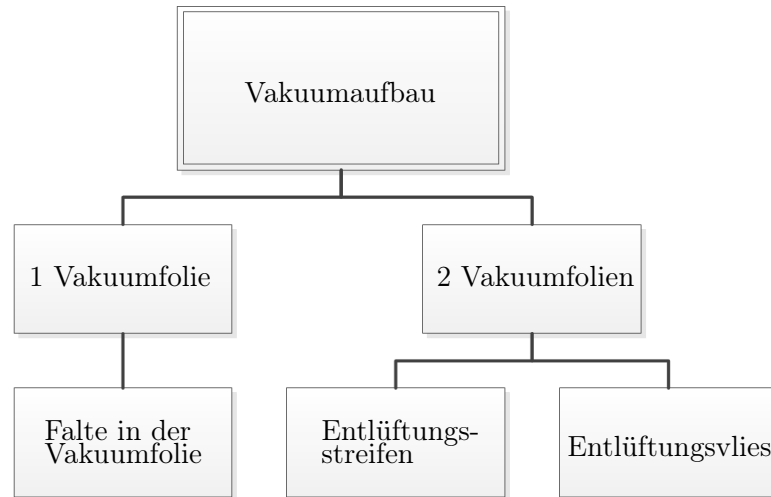


Abb. 6.4: Versuchsanordnungen, die sich voneinander ableiten lassen.

## 6.2 Einfluss des Vakuumaufbaus und der Hilfsstoffe

Das Verfahren nutzt einen Differenzdruck zwischen Kanal und Kavität für die Verformung einer Vakuumfolie. Daher hat auch der eigentliche Vakuumaufbau einen Einfluss auf die Infusionseigenschaften mit dem Verfahren. Als Vakuumaufbau wird in diesem Zusammenhang die Konfiguration des Versuchsaufbaus verstanden. Nach dem Stand der Technik sind Verfahren mit einer oder zwei Vakuumfolien bekannt. In der Abb. 6.4 sind die grundlegenden Vakuumaufbauten und die der Arbeit zu Grunde gelegten Versuche gezeigt.

Neben dem Vergleich zwischen einer Vakuumfolie und zwei Vakuumfolien werden auch Untersuchungen zu einer quer zum Kanal laufenden Falte im Vakuumaufbau gemacht. Bei den Versuchen mit einer zweiten Vakuumfolie wird der Vakuumaufbau durch die Verteilung der Hilfsstoffe variiert. Es werden hierfür drei Fälle unterschieden:

- 1.Fall: Kein Hilfsstoff kreuzt den Kanal.
- 2.Fall: Ein Entlüftungsvliesstreifen kreuzt den Kanal
- 3.Fall: Das Entlüftungsvlies liegt flächig zwischen 1. und 2. Vakuumfolie im gesamten Vakuumaufbau

Für alle Untersuchungen entspricht der Versuchsaufbau grundlegend dem in der Abb. 6.5 schematisch dargestellten Vakuumaufbau. Unterschiede im Vakuumaufbau ergeben sich jeweils nur durch die versuchsspezifischen Anforderungen. Zur Verbesserung der Harzversorgung des mittig auf dem Fasermaterial positionierten Kanals wird der Anguss Schlauch an ein Stück Fließhilfe angeschlossen. Als Drainage fungieren zwei Spiralschläuche, die

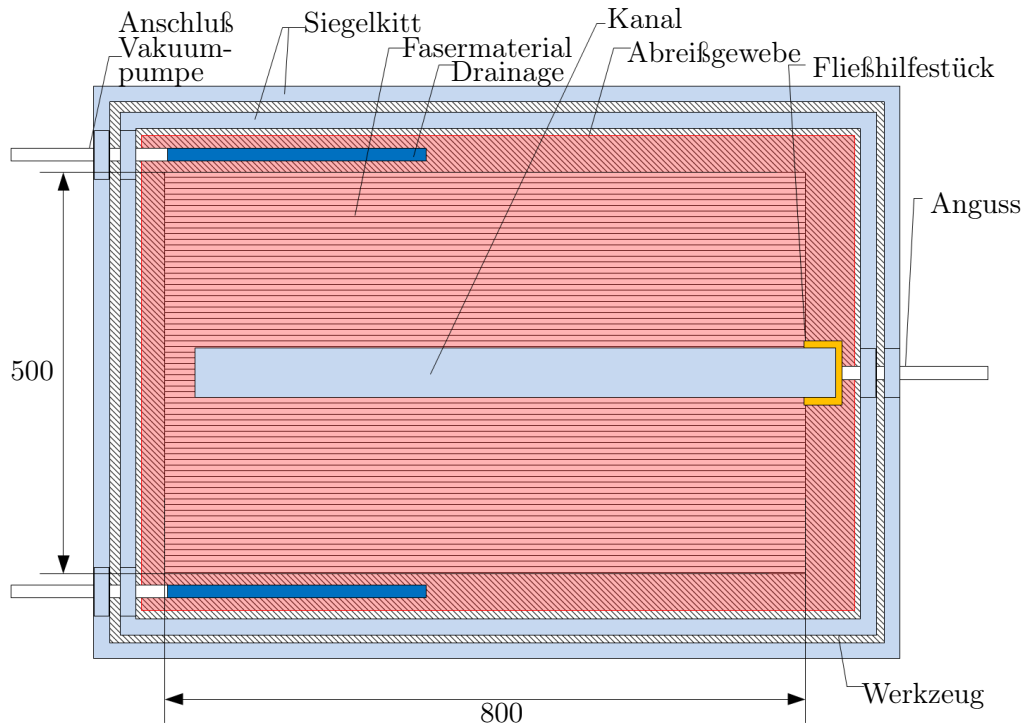


Abb. 6.5: Schematische Darstellung des grundlegenden Versuchsaufbaus zum Vergleich der Infiltrationszeiten.

jeweils an den langen Seiten des Fasermaterials platziert und mit einer Vakuumpumpe verbunden werden. Zwischen Vakuumfolie und Fasermaterial wird für eine leichtere Entformung eine Einzellage Abreißgewebe verwendet.

Für die Infiltration des Harzes wird zum einen immer die gleiche Harzmenge von 940g verwendet, zum anderen wird der Harzvorratsbehälter immer ca. 30cm unterhalb des Plattenwerkzeugs positioniert. Damit kann sichergestellt werden, dass der geodätische Druck immer gleich ist. Leichte Unterschiede können sich dennoch in Abhängigkeit des Volumenstroms ergeben, da der Harzspiegel im Harzvorratsbehälter in Abhängigkeit des Volumenstroms sinkt. Dieser Effekt wird aber als gering eingeschätzt und daher vernachlässigt.

Als Fasermaterial werden jeweils sechs Lagen Glasfaserbiaxialgelege (HP-B600E) mit einem Flächengewicht von  $606 \text{ g/m}^2$  verwendet. Der Lagenaufbau ist symmetrisch aus  $\pm 45^\circ$  Lagen aufgebaut. Bei allen Infusionsversuchen wird das Harzsystem Sicomin SR8100/SD8822 infiltriert.

Als Vergleichsgröße wird der Mittelwert der Infiltrationszeit, d.h. die Zeit zum Durchtränken des Fasermaterials, aus drei Versuchen verwendet. Ermittelt wird die Infiltrationszeit durch die Auswertung von Bildern einer Kamera, die parallel zur Bauteiloberfläche ausgerichtet ist. Als Referenzversuch dient ein Vakuumaufbau mit nur einer Vakuumfolie.

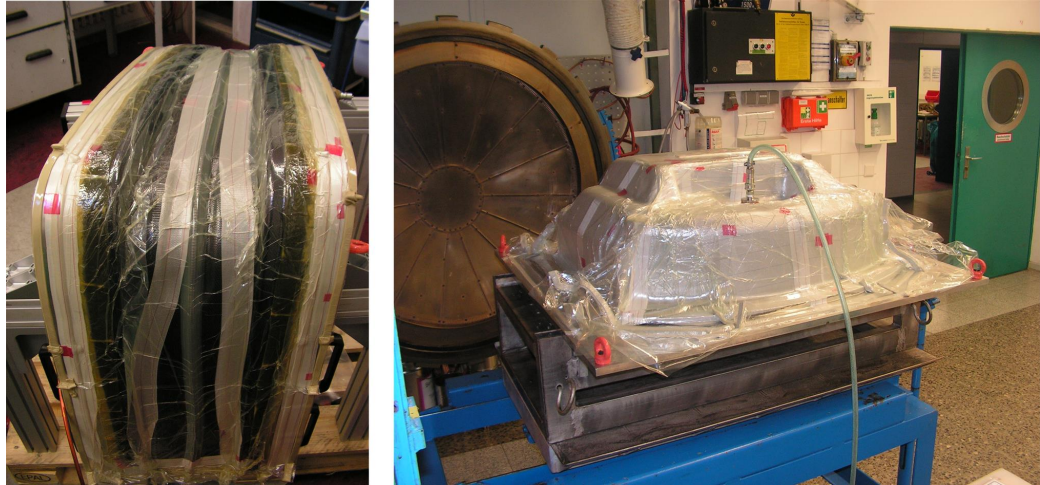


Abb. 6.6: Komplexe Vakuumaufbauten mit Faltenbildung in der Vakuumfolie (links: Innenschale B-Säule, rechts: Reserveradmulde).

### Falten in der Vakuumfolie

Vakuumaufbauten für die Herstellung von Infusionsbauteilen können, in Abhängigkeit des Bauteils, sehr komplex werden. Wie die Abb. 6.6 zeigt, sind häufig Falten in der Vakuumfolie die Folge.

Diese Falten haben zum einen einen Einfluss auf die Dichtigkeit des Kanals und zum anderen einen direkten Einfluss auf das Fließverhalten des Harzes im Kanalbereich. Die Imprägnierungsversuche haben gezeigt, dass sich die Infiltrationszeit, wie in Abb. 6.10 dargestellt, gegenüber den Referenzversuchen mit einer Vakuumfolie etwa verfünffacht.

Die Begründung für diesen erheblichen Anstieg der Imprägnierungsdauer kann durch die Bildung eines Harzpfropfens in der Falte gegeben werden. In der Abb. 6.7 ist die Expansion der Falte durch den Anstieg des Harzdrucks  $p_R$  schematisch dargestellt. Die expandierte Falte blockiert die Bildung des überlagerten Reinharzbereichs und erschwert somit den Harzfluss und verhindert ein Nachströmen des Harzes in den Bereich hinter der Falte.

### Zwei Vakuumfolien

Die meisten Vakuumaufbauten für Infusionsbauteile werden allerdings für eine höhere Prozesssicherheit mit einer zweiten Vakuumfolie aufgebaut. Hierdurch kann die Expansion in der Falte im Kanalbereich vermieden werden. Besonders vorteilhaft ist, wenn die zweite Vakuumfolie keine Falten aufweist oder die Falten nicht an der gleichen Position auftreten wie bei der ersten Vakuumfolie. Bei der Verwendung einer zweiten Vakuumfolie muss jedoch für eine ausreichende Drainagewirkung zwischen den Vakuumfolien gesorgt

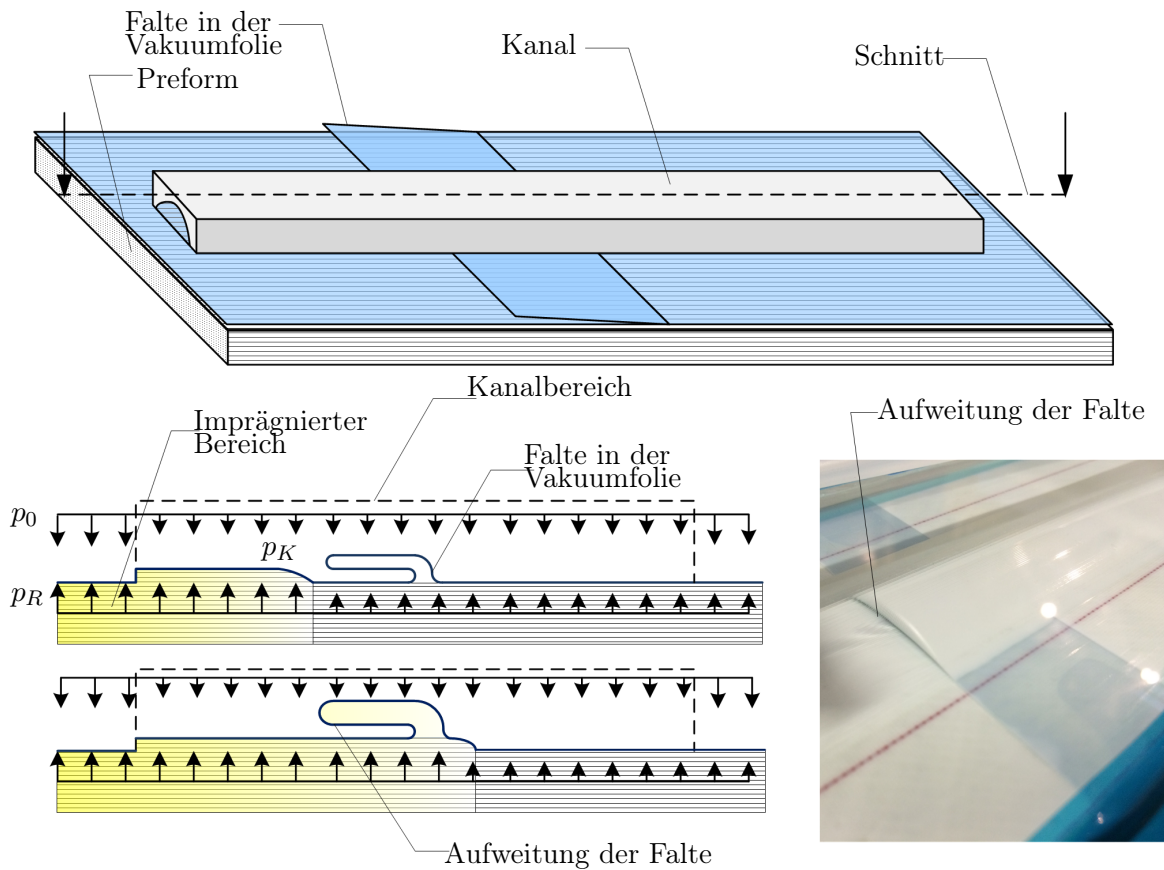


Abb. 6.7: Aufweitung der Falte im Kanalbereich. Oben: Darstellung der Position des Kanals zur Falte. Links: Schematische Darstellung der Folienaufweitung in der Schnittansicht. Rechts: Folienaufweitung gezeigt an einem transparenten Kanal mit eingefärbtem Harz

werden. In der Praxis erfolgt dies z.B. durch Abreißgewebestreifen oder Entlüftungsvliese (Breather).

Die Abb. 6.8 zeigt den schematischen Vakuumaufbau für zwei Vakuumfolien. In Bildteil **a)** ist zunächst nur die erste Vakuumfolie aufgebracht und an den Rändern (nicht im Bild gezeigt) gesiegelt. Die Kavität, die mit Fasermaterial gefüllt ist wird evakuiert. Daher ist der Druck innerhalb der Kavität  $p_K$  sehr viel geringer als der Atmosphärendruck  $p_0$ .

Der Bildteil **b)** zeigt zusätzlich die zweite Vakuumfolie, allerdings entspricht der Druck zwischen den beiden Vakuumfolien  $p_{1/2}$  immer noch dem Atmosphärendruck. Wird, wie in Bildteil **c)** dargestellt, der Bereich zwischen den Vakuumfolien evakuiert, entspricht dieser Druck  $p_{1/2}$  ungefähr dem Kavitätsdruck  $p_K$ . Die beiden Vakuumfolien werden durch den Atmosphärendruck  $p_0$  aufeinander gedrückt. Würde zwischen den beiden Folien keine Drainage verwendet werden, könnte die Luft zwischen den beiden Folien nicht oder nur sehr schwer entweichen.

Strömt das Harz, wie in Bildteil **d)** gezeigt, in die Kavität ein, gleicht sich der Kavitätsdruck  $p_K$  dem Harzdruck  $p_R$  an. In Abhängigkeit des Fließverhaltens entspricht der Druck  $p_R$  zumindest bei vollständiger Infiltration nahezu dem Atmosphärendruck.

Diese Betrachtung ist nur gültig, wenn keine Leckage in der ersten Vakuumfolie auftritt. Bei einer auftretenden Leckage in der ersten Vakuumfolie, passt sich der Druck  $p_{1/2}$  dem Kavitätsdruck an. Hierdurch wird deutlich, warum eine ausreichende Drainage zwischen erster und zweiter Vakuumfolie notwendig ist. Ist der Druck im Bereich der Leckage  $p_{1/2}$  größer als der Kavitätsdruck, weil der Bereich nicht ausreichend evakuiert wird, wird die Luft aus dem Bereich zwischen erster und zweiter Vakuumfolie in die Kavität gedrückt. Als Folge entstehen Poren oder auch trockene Bereiche.

Diese Betrachtung der Druckverhältnisse führt zu der Annahme, dass für die Kanalauslegung in Kapitel 3.3 die Membrandicke  $t_m$  sich aus der Summe der Einzeldicken der Vakuumfolie zusammensetzt. Im einfachsten Fall sind beide Vakuumfolien von der gleichen Dicke, weshalb die Membrandicke in diesem Fall einfach verdoppelt werden kann.

Die Abb. 6.10 zeigt, dass im Vergleich der Infusionszeiten zwischen einer und zwei Vakuumfolien nur ein marginaler Unterschied besteht. Dies zeigt auch der Standardfehler der beiden Messreihen, da eine deutliche Überlappung der Standardfehler vorhanden ist. Allgemein zeigt sich bei allen Versuchen, dass der Standardfehler bei der Verwendung einer zweiten Vakuumfolie geringer ausfällt und somit die Ergebnisse reproduzierbarer sind.

Wie bereits erwähnt, ist eine ausreichende Drainage zwischen den Vakuumfolien notwendig. Damit kreuzen zwangsläufig Drainagestreifen die Kanalbereiche. Die Drainagehilfsmittel besitzen allerdings eine gewisse Materialdicke und verringern somit den Kanalquerschnitt der Harzverteilungskanäle. Um diesen Einfluß abschätzen zu können, werden zwei Versuchsreihen unternommen. Bei der ersten Versuchsreihe kreuzt ein Entlüftungsvliesstreifen den Kanal quer auf einer Länge von ca. 5cm. Bereits dieses Hilfsmittel führt zu einer Verdreifachung der Infusionszeit, da der Kanalquerschnitt im Kreuzungsbereich



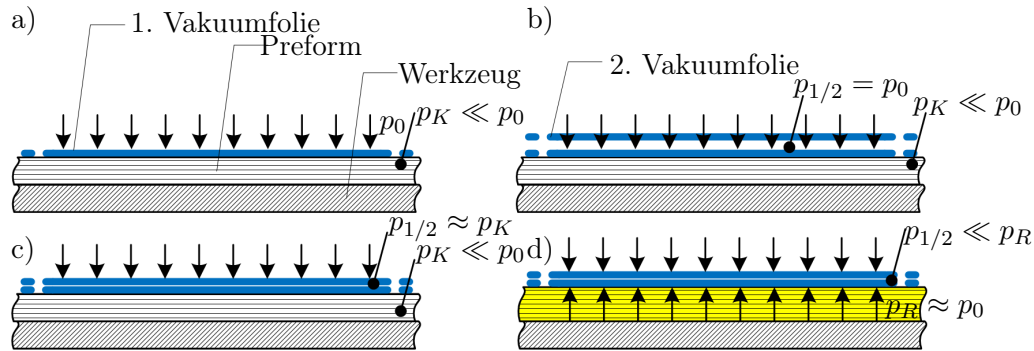


Abb. 6.8: Schematische Darstellung zur Verdeutlichung des Verhaltens bei der Verwendung von zwei Vakuumfolien. a) Nur eine Vakuumfolie; b) Bereich zwischen den Vakuumfolien nicht evakuiert, sodass der Druck zwischen den Vakuumfolien  $p_{1/2}$  dem Atmosphärendruck  $p_0$  entspricht; c) Bereich zwischen den Vakuumfolien evakuiert, sodass der Druck zwischen den Vakuumfolien  $p_{1/2}$  dem Druck in der Kavität  $p_K$  entspricht; d) Kavität füllt sich mit Harz, sodass der Druck in der Kavität auf den Druck des Harzes  $p_R$  ansteigt. Durch den wesentlich geringeren Druck  $p_{1/2}$  werden die Folien aufeinander gedrückt.

verengt wird und ähnlich zum Versuch mit einer Falte das Harz weniger schnell nachströmen kann. Die Abb. 6.9 zeigt, dass sich im Bereich des Entlüftungsvliesstreifens die Fließfront einschnürt. Erst mit fortschreitender Infiltrationszeit gleich sich dieser Effekt aus.

Eine ähnliche Vergrößerung der Infusionszeit stellt sich bei der flächigen Verwendung eines Entlüftungsvlieses ein. Die gemittelte Infiltrationszeit fällt allerdings etwas geringer aus als beim Versuch mit einem Entlüftungsvliesstreifen. Durch die flächige Verwendung des Entlüftungsvlieses steigt die Biegesteifigkeit des Folienpakets durch Erhöhung des Flächenträgheitsmoments an. Daher kann das Folienpaket die durch das Fasermaterial hervorgerufenen Unebenheiten besser ausgleichen als zwei Vakuumfolien ohne Entlüftungsvlies. Hierdurch entstehen mehr Fließwege und dieses Verhalten ist ähnlich der Verwendung eines Deckblechs (caul plate) in der Kavität.

Die Versuche zeigen, dass Falten und Hilfsstoffe einen Einfluss auf das Verfahren haben. Daher sollte nach Möglichkeit die Bildung von Falten vermieden werden, oder der auftretende Effekt durch die Verwendung einer zweiten Vakuumfolie unterbunden werden. Bei der Verwendung von Hilfsstoffen zwischen erster und zweiter Vakuumfolie gilt es die Kanalbereiche auszusparen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Hilfsstoffe mit in die Auslegung der Kanäle einzubeziehen. Allerdings ist hierbei zu prüfen, ob die Annahmen für eine Membranverformung noch gelten. Eine Voraussetzung für die Anwendung der Membranverformung ist, dass der Biegepeil sehr viel größer ist als die Foliendicke. Ist dies nicht mehr der Fall, müsste die Kanalauslegung mit Hilfe der Plattentheorie erfolgen.

## 6 Anwendung des Verfahrens

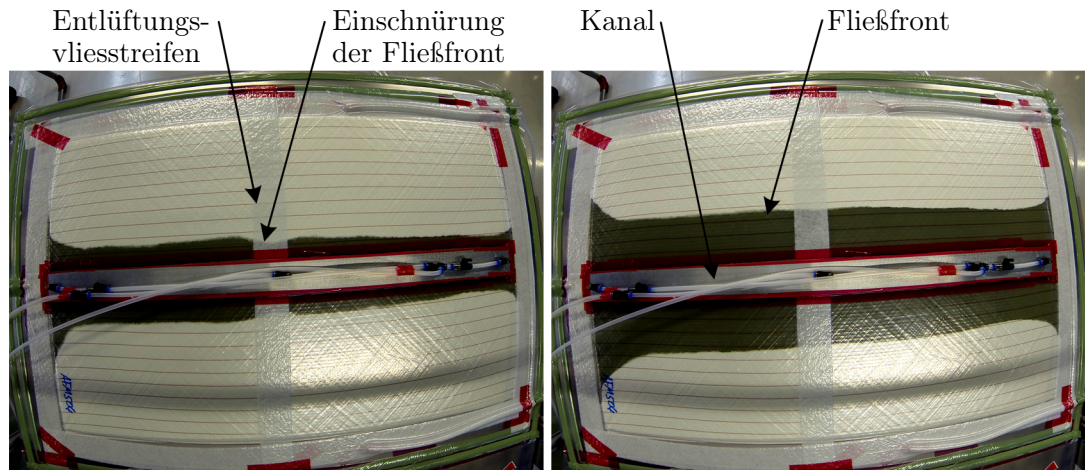


Abb. 6.9: Infusionsversuch mit zwei Vakuumfolien und einem Entlüftungsvliesstreifen, der den Harzverteilungskanal kreuzt, zwischen erster und zweiter Folie. Links: Einschnürung der Fließfront im Bereich des Entlüftungsvliesstreifens zu Beginn der Infusion. Rechts: Ausgleich der Einschnürung mit fortschreitender Infusionszeit (ca. 5 min. später als linkes Bild).

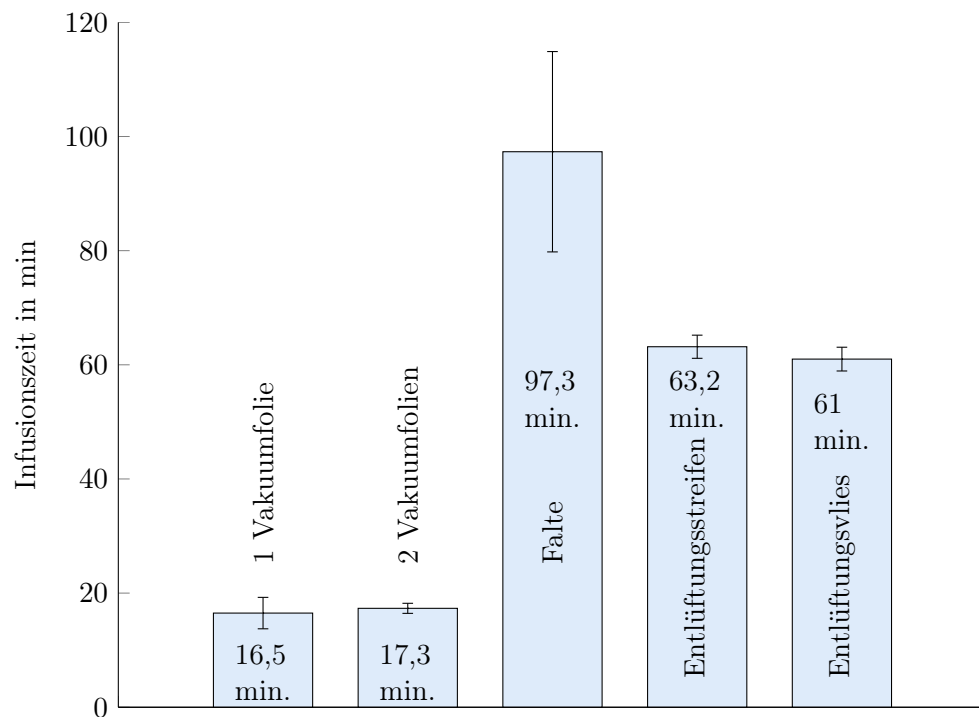


Abb. 6.10: Vergleich der Infusionszeiten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. (Datenbasis aus [60])

## 6.3 Unterteilung der großen Bauteilfläche in rautenförmige Teilbereiche

Der große Vorteil des Verfahrens liegt in der Möglichkeit, die Harzverteilungs Kanäle auf der Bauteiloberfläche zu positionieren ohne Abdrücke zu hinterlassen und damit die Fließhilfe zu ersetzen. Eine Strategie hierfür ist, die große Bauteiloberfläche in kleinere Bereiche durch entsprechende Kanalanordnung zu unterteilen. Vorteilhaft hierbei erscheint es rautenförmige Bereiche zu schaffen. Die Rauten bieten den Vorteil, dass das Harz nicht um scharfe Ecken fließen muss. Dies wäre der Fall bei der Unterteilung in Rechtecke oder Quadrate.

In der Abb. 6.11 ist die rautenförmige Kanalanordnung gezeigt. Als Spülkavität ("InfuLine-2") ist hierbei eine Kombination aus Fließhilfe (gelb) und Spiralschlauch gewählt worden. Der Spiralschlauch der Spülkavität wird bei dieser Art in einer Folienfalte oberhalb des Bauteils angeordnet und nur durch die Fließhilfe mit der Bauteiloberfläche verbunden. Auch hierdurch werden nur sehr geringe Abdrücke auf der Bauteiloberfläche hinterlassen.

Die gezeigte Vorgehensweise kann auch in der Kombination mit einer VAP- Membran verwendet werden. Prinzipiell sind hier zwei Möglichkeiten anwendbar. Die Spülkavität aus Abb. 6.11 kann durch einen VAP Membranstreifen ersetzt werden, der mit der restlichen Vakuumfolie verbunden wird und somit als lokale Drainage wirkt. Eine weitere Möglichkeit ist die VAP Membran auf der gesamten Bauteiloberfläche zu verwenden und die Angusskanäle, wie in Abb. 6.11, anzuordnen.

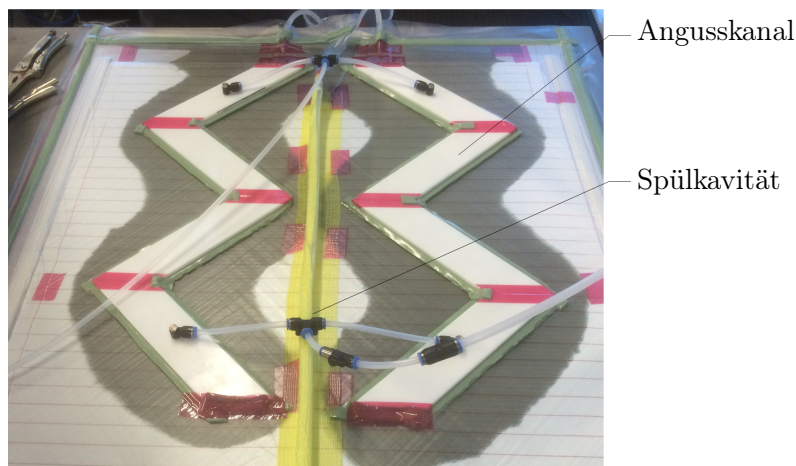


Abb. 6.11: Rautenförmige Angusskanalanordnung mit Spülkavität.

Da die Fließfront durch eine VAP- Membran nur schwer zu erkennen ist, sind in der Abb. 6.12 vier Thermografiebilder zu unterschiedlichen Zeitpunkten eines Infusionsversuchs mit einer VAP- Membran gezeigt. Für den Versuch ist das Formwerkzeug mit Fa-sermaterial und Vakuumaufbau auf ca. 50°C aufgeheizt und das kältere Harz (ca. 20°C)

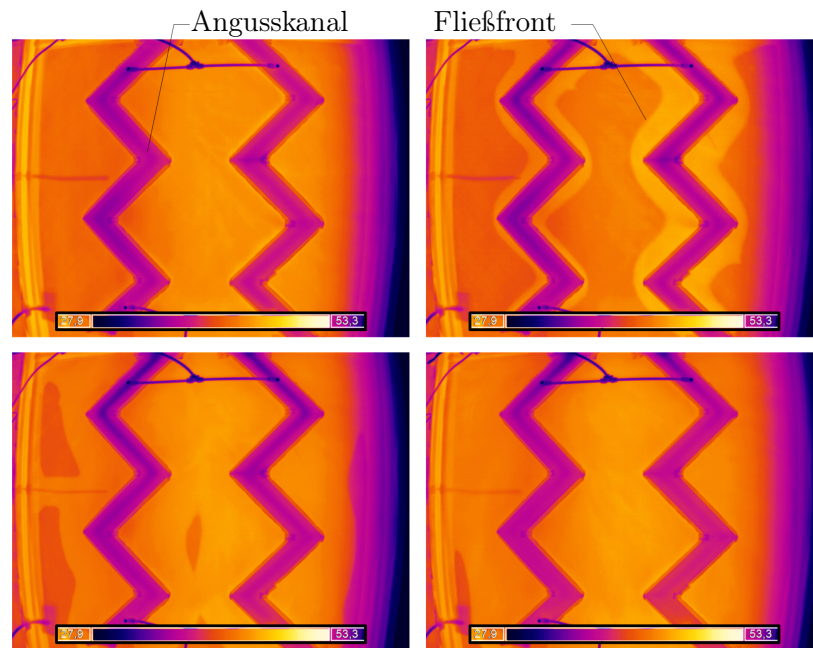


Abb. 6.12: Rautenförmige Angusskanalanordnung in Kombination mit einer VAP- Membran. Die Fließfront ist durch Infrarotbilder sichtbar gemacht worden.

infiltriert worden. Der Temperaturunterschied zwischen Harz und Bauteil wird durch eine Infrarotkamera erfasst und stellt somit den Fließfrontverlauf des Harzes dar. Der Versuchsaufbau ist analog zum Versuchsaufbau in Abb. 6.11.

Bei beiden Vorgehensweisen können durch die semipermeable VAP Membran die restliche Luft und die ausgasenden Harzbestandteile abgeführt werden. Bei der flächigen Verwendung muss aber für die Kanäle beachtet werden, dass ein Drainagehilfsmittel zwischen VAP Membran und Vakuumfolie verwendet werden muss. Sind die Kanäle hierfür nicht groß genug ausgelegt, steigen, wie in Abb. 6.10 gezeigt, die Imprägnierungszeiten stark an. Werden sehr dicke Hilfsstoffe zwischen erstem und zweitem Vakuumsack verwendet, müsste für die in Kapitel 3 verwendete Membrantheorie die Plattentheorie für die Bestimmung der Kanalgeometrie angewendet werden.

## 6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Bestimmung des Prozessfensters hat gezeigt, dass es möglich ist einen begründeten Zeitraum zu definieren, in dem das überschüssige Harz aus dem Kanalbereich abfließen kann. Außerdem ist es möglich, mit dem Prozessfenster, in Abhängigkeit von der Harzviskosität und der Faserpermeabilität, den notwendigen Abstand zwischen Angusskanal und Spülkavität zu ermitteln. Die Arbeitshypothese III

“Es gibt ein maximales Prozessfenster, d.h. einen Zeitraum in Abhängigkeit von Harzviskosität und Faserpermeabilität, in dem die Kanäle rückstandsfrei aufgelöst werden können.”

kann daher als bestätigt betrachtet werden. Die Abschätzung des Prozessfensters kann auch als Startwert für eine Fließsimulation genutzt werden.

Das Prozessfenster zeigt auch, dass das Harz aus den Kanälen am Ende der Infusion für die Durchtränkung des Fasermaterials genutzt werden kann und damit einen Vorteil gegenüber konventionellen Infusionsverfahren darstellt. Etwas Harzüberschuss wird trotzdem benötigt, um die restliche Luft aus dem Laminat in die Spülkavität zu spülen.

In [28] wird vorgeschlagen, den Harzzufluss vor der vollständigen Imprägnierung zu stoppen und das Harz aus dem bereits imprägnierten Laminatbereich für die vollständige Imprägnierung zu nutzen. Hierdurch stellt sich der Druckausgleich über den Fließweg wesentlich schneller ein, als bei der klassischen Infusion. In Kombination mit den Kanälen kann das überschüssige Harz aus dem Kanalbereich für diese Vorgehensweise genutzt werden. Außerdem muss auch der stark komprimierte Bereich am Kanalrand (siehe 3.2) ausgeglichen werden. Diese Effekte tragen dazu bei, dass die ermittelte Anfangszeit  $\tau_A$  zum Belüften des Kanals als konservativ einzuschätzen ist. Die Abschätzung kann allerdings als Startwert für eine Fließsimulation genutzt werden und durch die Simulation kann die veränderliche Permeabilität berücksichtigt werden.

Aus der Untersuchung des Hilfsstoffeinflusses geht hervor, dass bei den Vakuumaufbauten bzw. bei der Kanaldimensionierung diese Randbedingungen unbedingt beachtet werden müssen. Dies spielt bei konventionellen Infusionsverfahren eher eine untergeordnete Rolle, da sich die Hilfsstoffe außerhalb der Kavität befinden. Damit sind klare Grundregeln für die Auslegung des Vakuumaufbaus und die Anwendung des Verfahrens definiert. Nach dem Aushärten des Laminats ist es bei allen Versuchen möglich gewesen, die Kanäle von der Vakuumfolie zu trennen, sodass die Kanäle nicht als Fertigungsabfall angefallen sind.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit ist die Vakuumdifferenzdruckinfusion vorgestellt worden. Es sind die grundlegenden Fragestellungen zur Dimensionierung von Angusskanälen und die Auswirkungen der Kanäle auf Faserhalbzeuge analysiert und bewertet worden. Das übergeordnete Ziel hierbei ist, das Verfahren für die industrielle Anwendung nutzbar zu machen.

In Kapitel 3 sind eine grundlegende Beschreibung des Infusionsverfahrens gemacht und die Randbedingungen zur Untersuchung des Verfahrens aufgestellt worden. Es ist auch die Kombination von Fließhilfe und der Vakuumdifferenzdruckinfusion gezeigt worden, allerdings kann durch die hohe Permeabilität der Fließhilfe kein Voreilen in den Kanälen erzeugt werden. Dieser Effekt könnte aber durch 3D Fließhilfentextilien, vorausgesetzt diese Textilien lassen sich ausreichend komprimieren, geschaffen werden.

Für die Berechnung ist eine Lagerung mit unverschieblichen Rändern angenommen worden, um die Folie definiert verformen zu können. Praktisch umgesetzt ist diese Lagerung mit einem doppelseitigem Klebefilm. Dieser übernimmt zusätzlich die Dichtung der Kanäle an den Rändern. Nachteilig hat sich bei den Versuchen allerdings gezeigt, dass diese Verbindung nicht wiederverwendbar ist. Zukünftig sollte daher eine wiederverwendbare Kombination aus Dichtung und Lagerung eingesetzt werden. Hierbei ist natürlich auf die Welligkeit des Fasermaterials und die Hilfsstoffe Rücksicht zu nehmen.

Außerdem ist die Auswirkung der Luftfeuchtigkeit auf die Vakuumfolie beschrieben worden. Bei höheren Temperaturen, wie für die Infusion und Aushärtung latenter Harzsysteme notwendig, kann die Verformung der Folie kritisch werden. Für die Anwendung des Verfahrens für diese Harzsysteme müssen noch Untersuchungen gemacht oder ein anderes Folienmaterial verwendet werden.

Da ein analytisches Modell zur Bestimmung der Dickenänderung des Fasermaterials fehlt, ist durch die Herstellung von Stufenkeilen die Biegung des Fasermaterials ermittelt worden. Es hat sich gezeigt, dass für das verwendete Material ein linearer Zusammenhang zwischen Lagenanzahl und Dickenänderung besteht. Dies ist auch der Fall, wenn die Kanalbreite verdoppelt wird. Eine Untersuchung, ob sich dieses Verhalten auch bei anderen Faserhalbzeugen und Winkeln zeigt, steht noch aus. Zumindest kann durch die experimentelle Vorgehensweise eine Berücksichtigung des Fasermaterialverhaltens bei der Kanalauslegung erfolgen. Bei bebinderten Fasermaterialien kann der Effekt minimiert oder sogar aufgehoben werden. Eventuell könnte durch die parallele Anordnung von Kanälen ein ähnlicher Effekt, wie bei der Verwendung eines bebinderten Materials, erzielt werden. Somit würde die Umsetzung des Verfahrens für unbebinderte Fasermaterialien erleichtert werden.

Kapitel 4 hat sich mit den bereits erwähnten strömungsmechanischen Verlusten und einem Vergleich zwischen konventionellen und neuen Kanalgeometrien beschäftigt. Die Verifikation des Kanalkennwerts ist mit der Fließsimulationssoftware RTM- Worx an einem einfachen kreisrunden Querschnitt durchgeführt worden. Für die weiteren durchgeführten Simulationen sind allerdings Kompromisse in Kauf genommen worden, da die Software eher für die Simulation des Fließverhaltens in geschlossenen Formwerkzeugen geeignet ist. Dadurch werden Effekte, wie zum Beispiel veränderliche Bauteildicke, veränderlicher Faservolumengehalt und Änderung der Permeabilität, nicht berücksichtigt. Daher sollte für zukünftige Anwendungen auf eine andere Simulationsumgebung zurückgegriffen oder eine Erweiterung der Software RTM- Worx umgesetzt werden.

Dennoch ist durch die Verwendung der Carman- Kozeny Beziehung der grundlegende Umgang mit einem niedrigeren Faservolumengehalt und damit höherer Faserpermeabilität im Kanalbereich gezeigt worden. Das Modell ist aufgrund seiner Simplität verwendet worden und könnte, für eine bessere Vorhersage, in Zukunft durch angepasste Modelle ersetzt werden.

Die Annahme, dass die strömungsmechanischen Verluste durch die Steigerung der Permeabilität ausgeglichen werden können, hat sich nicht bestätigt. Um die Verluste ausgleichen zu können, muss die Faserpermeabilität in der Größenordnung der Ersatzpermeabilität eines kreisrunden Angusskanals liegen.

Eine weitere Problemstellung sind die eventuell zurückbleibenden Kanalabdrücke auf der Bauteiloberfläche. Durch die Untersuchung vieler verschiedener Laminataufbauten und Faserhalbzeuge in Kapitel 5 kann dies mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden und daher ist eine Übertragung auf andere Laminatarchitekturen gegeben. Selbst bei Unidirektionalgelegen, die in Kanallängsrichtung ausgerichtet sind, liegen die Abweichungen innerhalb der ermittelten Dickentoleranz der Halbzeuge. Der visuelle Vergleich durch Schliffbilder bestätigt die Aussagekraft der taktilen Dickenvermessung und zeigt keine auffälligen Faserondulationen oder Harzansammlungen.

Die Dimensionierung der Kanäle auf analytischem Wege hat gezeigt, dass die Kanäle in ihrer Geometrie stark von der Geometrie konventioneller Kanäle abweichen. Diese für die Verformung konventioneller Vakuumfolien notwendige Kanalform schafft das Problem, dass die Kanäle strömungsmechanisch mit großen Verlusten behaftet sind. Sollen die Kanäle die herkömmlichen Kanäle ersetzen, sind größere Kanalquerschnitte vorzusehen. Diese Querschnittsvergrößerung führt aber nicht zu einem größeren Harzverbrauch. Vielmehr kann das Harz in den Kanälen zur vollständigen Tränkung des Fasermaterials genutzt werden, was im Kapitel 6 analytisch belegt worden ist.

Zusätzlich ist der Einfluss von Hilfsstoffen auf die Vakuumdifferenzdruckinfusion untersucht worden. Anders als bei herkömmlichen Infusionsverfahren haben die Hilfsstoffe teilweise einen großen Einfluß auf das neue Infusionsverfahren. Dies liegt an der Position der Kanäle außerhalb der Kavität, sodass die Kanäle die bereits vorhandenen Hilfsstoffe zur Kanalbildung mit verformen müssen. Ein Vergleich von Infiltrationszeiten zeigt



die Auswirkungen deutlich, wodurch aber klare Empfehlungen zur Gestaltung des Vakuumaufbaus aufgestellt werden können. Diese Empfehlungen können zukünftig direkt bei der Auslegung der Kanäle berücksichtigt werden, wobei in Abhängigkeit der Dicke der Hilfsstoffe die Plattentheorie angewendet werden muss.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass als Gesamtergebnis der einzelnen Untersuchungen die Haupthypothese

“Durch die Verwendung von wiederverwendbaren und temporär aktivierbaren Harzverteilungskanälen können harzverbrauchende Infusionshilfsstoffe, wie Fließhilfen, ersetzt werden, ohne im Laminat unzulässige Schädigungen, wie Faserondulationen und Harzansammlungen, zu verursachen.”

zutreffend ist. Allerdings können konventionelle Kanäle nicht ohne weiteres durch Kanäle der Vakuumdifferenzdruckinfusion ersetzt werden. Werden jedoch der Kanalkennwert aus Kapitel 4 und die aufgestellten Regeln für den Vakuumaufbau aus Kapitel 6 beachtet, ist das Verfahren für die Infusion von Faserverbundbauteilen hervorragend geeignet. Die zum Ausgleich der Strömungsverluste notwendigen größeren Kanalquerschnitte, steigern nicht den Harzverbrauch bei der Vakuumdifferenzdruckinfusion. Das übergeordnete Ziel des nachhaltigen Infusionsverfahrens ist damit erreicht.

Die in Kapitel 3 bereits benannten und in dieser Arbeit gezeigten Vorteile

- nahezu rückstandsfreie Auflösung des Kanals (kaum Abdrücke auf der Bauteiloberfläche)
- Nutzung der Kanäle direkt auf der Bauteiloberfläche
- Reduzierung des Harzverbrauchs
- Zugänglichkeit zu den Kanälen auch während der Infusion
- Kanäle können im Notfall zur Unterstützung von klassischen Infusionsverfahren genutzt werden, ohne die ursprüngliche Infusionsstrategie zu beeinflussen
- Wiederverwendbarkeit der Harzverteilungskanäle

stellen einen Mehrwert für die industrielle Anwendung des Verfahrens dar, da sich das Potential der Kosteneinsparung durch die Reduzierung des Harzverbrauchs und der Wiederverwendung der Angusskanäle ergibt. Zusätzlich begünstigen die beschriebenen ersten Erkenntnisse über das Verfahren die zukünftige Anwendung bei großen Infusionsbauteilen, die bisher mit vielen Fertigungsabfällen und erhöhtem Harzverbrauch hergestellt worden sind.



# Literaturverzeichnis

- [1] S. G. Advani und E. M. Sozer. *Process modeling in composites manufacturing*. New York, NY [u.a.]: Marcel Dekker, 2002, S. IX, 436. ISBN: 0-8247-0860-1.
- [2] M. Allende, R. V. Mohan und S. M. Walsh. „Experimental and numerical analysis of flow behavior in the FASTRAC liquid composite manufacturing process“. In: *Polymer Composites* 25.4 (2004), S. 384–396. ISSN: 1548-0569.
- [3] J. B. Alms, S. G. Advani und J. L. Glancey. „Liquid Composite Molding control methodologies using Vacuum Induced Preform Relaxation“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42.1 (2011). ..., S. 57–65.
- [4] J. B. Alms, J. L. Glancey und S. G. Advani. „Mechanical properties of composite structures fabricated with the vacuum induced preform relaxation process“. In: *Composite Structures* 92.12 (2010). ..., S. 2811–2816.
- [5] J. Alms und S. G. Advani. „Simulation and experimental validation of flow flooding chamber method of resin delivery in liquid composite molding“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38.10 (2007), S. 2131–2141. ISSN: 1359-835X.
- [6] S. Amico und C. Lekakou. „An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding“. In: *Composites Science and Technology* 61.13 (2001). ..., S. 1945–1959.
- [7] S. C. Amouroux, D. Heider und J. W. Gillespie Jr. „Characterization of membranes used in pressure driven composite processing“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41.2 (2010). ..., S. 207–214.
- [8] V. Antonucci und M. R. Ricciardi. „Pulsed Infusion: a new liquid moulding process“. In: *Jecmagazine* 77 (2012). Hrsg. von JEC, S. 42–43.
- [9] A. A. B. Baker. *Composite materials for aircraft structures*. AIAA, 2004.
- [10] J. Beaumont und H. Sambale. *Auslegung von Anguss und Angusskanal: Spritzgiesswerkzeuge erfolgreich einsetzen*. Hanser, 2012. ISBN: 9783446427594.
- [11] F. Beitz. *1000 Tipps zum Spritzgießen: Band 3: Angusskanaltechnik - Grundlagen mit Praxisanleitungen*. Beuth Verlag GmbH, 2006. ISBN: 9783410214755.
- [12] W. Bergmann. *Werkstofftechnik: Grundlagen und Anwendung*. 5. Aufl. Hanser Studien-Bücher. München [u.a.]: Hanser, 2003, ... ISBN: 3-446-40082-6, 978-3-446-40082-5;

- [13] S. Bickerton, H. C. Stadtfeld, K. V. Steiner und S. G. Advani. „Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding“. In: *Composites Science and Technology* 61.11 (2001). ..., S. 1625 –1637.
- [14] M. A. Braniff, W. J. T. Millar und R. S. Wolson. „A bagging blanket and method for forming a fibre reinforced resin composite component“. Pat. GB000002316036B. 1998.
- [15] B. Brecht, H. F. Brookes und C. E. Fraenkel. *Leben des Galilei*. Aufbau-Verlag, 1958.
- [16] W. D. Brouwer, E. C. F. C. van Herpt und M. Labordus. „Vacuum injection moulding for large structural applications“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34.6 (2003). ..., S. 551 –558.
- [17] N. Correia, F. Robitaille, A. Long, C. Rudd, P. Simacek und S. Advani. „Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36.12 (2005), S. 1645 –1656. ISSN: 1359-835X.
- [18] D. Cripps, T. J. Searle und J. Summerscales. „2.21 - Open Mold Techniques for Thermoset Composites“. In: *Comprehensive Composite Materials*. Hrsg. von A. Kelly und C. Zweben. ... Oxford: Pergamon, 2000, S. 737 –761. ISBN: 978-0-08-042993-9.
- [19] R. Dave, J. L. Kardos und M. P. Duduković. „A model for resin flow during composite processing: Part 1 - general mathematical development“. In: *Polymer Composites* 8.1 (1987), S. 29–38. ISSN: 1548-0569.
- [20] H. Degischer und S. Lüftl. *Leichtbau*. Wiley, 2012. ISBN: 9783527659869.
- [21] *DIN EN 2564:1998 Kohlenstofffaser-Laminate. Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile*. 1998.
- [22] *DIN EN ISO 4288:1998-04 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*. 1998.
- [23] G. W. Ehrenstein. *Faserverbund-Kunststoffe - Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*. 2., völlig überarb. Aufl. München [u.a.]: Hanser, 2006, S. XXIX, 297. ISBN: 978-3-446-22716-3.
- [24] J. Filsinger, T. Lorenz, F. Stadler und S. Utecht. „Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von faserverstärkten Bauteilen mittels eines Injektionsverfahrens“. Pat. DE Patent 10156123 B4. 2001.
- [25] A. Föppl und L. Föppl. *Drang und zwang*. Bd. 1. R. Oldenbourg, 1920.
- [26] K. L. Forsdyke und T. F. Starr. *Thermoset resins - a Rapra market report*. Shawbury, U.K: Rapra Technology Ltd, 2002, Online-Ressource (124 p). ISBN: 1-85957-355-X.
- [27] G. Ginger. „Resin Infusion: Taking off?“ In: *Composites World* (2016).

- [28] Q. Govignon, S. Bickerton und P. Kelly. „Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41.1 (2010). Special Issue: Flow Processes in Composite Materials, S. 45–57. ISSN: 1359-835X.
- [29] D. A. Griffin. „Blade system design studies volume I: Composite technologies for large wind turbine blades“. In: *Sandia National Laboratories, Paper No. SAND-1879* (2002).
- [30] D. Gross, W. Hauger und P. Wriggers. *Technische Mechanik 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN: 9783642410000.
- [31] K. Grote und J. Feldhusen. *Dubbel*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN: 9783540681915.
- [32] T. Gutowski, Z. Cai, S. Bauer, D. Boucher, J. Kingery und S. Wineman. „Consolidation Experiments for Laminate Composites“. In: *Journal of Composite Materials* 21.7 (1987), S. 650–669.
- [33] M. Hahn und P. Gilman. „Offshore Wind Market and Economic Analysis“. In: (2014).
- [34] A. Hammami. „Effect of reinforcement structure on compaction behavior in the vacuum infusion process“. In: *Polymer Composites* 22.3 (2001), S. 337–348. ISSN: 1548-0569.
- [35] D. Heider, P. Simacek, A. Dominauskas, H. Deffor, S. Advani und J. W. Gillespie Jr. „Infusion design methodology for thick-section, low-permeability preforms using inter-laminar flow media“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38.2 (2007). ..., S. 525–534.
- [36] E. van Herpt. „Method for the manufacture of a reinforced plastic product“. Pat. EP Patent 1,626,860. 2007.
- [37] A. Hindersmann, M. Kühn und J. Bölke. „Vakuuminfusionsverfahren und Vorrichtung dafür“. Pat. EP Patent 2700493 B1. 2015.
- [38] A. Industrievereinigung. *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 9783658027551.
- [39] M. Klein und P. Kiehl. *Einführung in die DIN-Normen*. Teubner, 2001. ISBN: 9783519263012.
- [40] F. Klunker. „Aspekte zur Modellierung und Simulation des Vacuum Assisted Resin Infusion“. Diss. Technische Universität Clausthal, 2008.
- [41] M. Koefoed Scholart. „Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades“. Diss. Aalborg University, 2003.
- [42] T. M. Kruckenberg und R. Paton. *Resin transfer moulding for aerospace structures*. Dordrecht [u.a.]: Kluwer, 1998, S. XX, 522. ISBN: 0412731509.

- [43] E. J. Lang und R. W. Rydin. „Channel Assisted Resin Transfer Molding“. Pat. 2003.
- [44] G. Marsh. „Bombardier throws down the gauntlet with {C-Series} airliner“. In: *Reinforced Plastics* 55.6 (2011), S. 22 –26. ISSN: 0034-3617. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-3617\(11\)70181-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-3617(11)70181-3).
- [45] G. Marsh. „Composites in commercial jets“. In: *Reinforced Plastics* 59.4 (2015), S. 190 –193. ISSN: 0034-3617. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.repl.2015.06.001>.
- [46] D. Modi, N. Correia, M. Johnson, A. Long, C. Rudd und F. Robitaille. „Active control of the vacuum infusion process“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38.5 (2007). ..., S. 1271 –1287.
- [47] M. Neitzel, P. Mitschang und G. Beresheim. *Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Permeabilitätsmessung 184. München [u.a.]: Hanser, 2004, S. XV, 440. ISBN: 978-3-446-22041-6.
- [48] C. Niggemann, Y. Seok, J. W. Song Gillespie und D. Heider. „Experimental Investigation of the Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion (CAPRI) Process“. In: *Journal of Composite Materials* 42.11 (2008). ..., S. 1049 –1061.
- [49] B. Rasch, M. Frieze, W. Hofmann und E. Naumann. *Quantitative Methoden: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler Bd. 1: [Deskriptive Statistik, Inferenzstatistik, t-Test, Korrelationstechniken, Regressionsanalyse] (clone)*. 4. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer, 2014, ... ISBN: 978-3-662-43523-6.
- [50] M. R. Ricciardi, V. Antonucci, M. Durante, M. Giordano, L. Nele, G. Starace und A. Langella. „A new cost-saving vacuum infusion process for fiber-reinforced composites: Pulsed infusion“. In: *Journal of Composite Materials* 48.11 (2014), S. 1365–1373.
- [51] E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu und J. Bréard. „Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites“. In: *Composites Science and Technology* 66.3–4 (2006). ..., S. 475 –486.
- [52] J. S. U. Schell und P. Ermanni. „Experimental Investigation of the Fibre Bundle Permeability as a Function of Saturation“. In: *Proc. of ICCM 15 Conference on Composite Materials*. Durban South Africa, 2005.
- [53] H. Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN: 9783540721901.
- [54] W. H. Seemann. „Plastic transfer molding techniques for the production of fiber reinforced plastic structures“. Pat. 1990.
- [55] T. Shinoda, H. Odani, E. Wadahara, Y. Komori und T. Shono. „A-Vartm Technology Application for Japan’s new regional jet aircraft“. In: *16th ICCM*. Kyoto Japan, 2007.

- [56] P. Simacek, Ö. Eksik, D. Heider, J. W. G. Jr. und S. Advani. „Experimental validation of post-filling flow in vacuum assisted resin transfer molding processes“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43.3 (2012), S. 370 –380. ISSN: 1359-835X.
- [57] C. Soutis. „Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction“. In: *Materials Science and Engineering: A* 412.1–2 (2005). International Conference on Recent Advances in Composite Materials, S. 171 –176. ISSN: 0921-5093. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.064>.
- [58] M. A. A. Spaid und F. R. Phelan Jr. „Modeling void formation dynamics in fibrous porous media with the lattice Boltzmann method“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 29.7 (1998). ..., S. 749 –755.
- [59] J. Spurk. *Strömungslehre: Einführung in die Theorie der Strömungen*. Springer-Verlag, 2013.
- [60] E. M. Stegel. *Einfluss des Vakuumaufbaus auf die Vakuumdifferenzdruckinfusion*. 2015.
- [61] T. Ströhlein. *Volumetrische Erwärmung von Kohlenstofffaserhalbzeugen*: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. DLR, 2012.
- [62] O. Volkersen. *Die eingespannte, an den Rändern versteifte, dünne Rechteckplatte großer Durchbiegung mit gleichmäßig verteilter Belastung*. Vereinigte Universitäts- u. Fachbuchhandl. im Komm., 1963.
- [63] L. Weiß, T. Glaser, C. Hühne und M. Wiedemann. „Characterisation of the sliding friction response of peel-ply textured surfaces“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 63 (2014), S. 123 –132. ISSN: 1359-835X.
- [64] J. Wiedemann. *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. Springer-Verlag, 2007.
- [65] M. Wiedemann. *Adaptive, tolerant and efficient composite structures*. Berlin [u.a.]: Springer, 2013, S. XVI, 462. ISBN: 978-3-642-29189-0.
- [66] J. Woods, A. Modin, R. Hawkins und D. Hanks. *Controlled atmospheric pressure resin infusion process*. EP Patent 1,507,647. 2012.
- [67] K. Yazdchi, S. Srivastava und S. Luding. „On the validity of the Carman-Kozeny equation in random fibrous media“. In: *Eccomas*. 2011.
- [68] B. Yenilmez, M. Senan und E. Murat Sozer. „Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process“. In: *Composites Science and Technology* 69.11–12 (2009). ..., S. 1710 –1719.
- [69] B. Yenilmez und E. M. Sozer. „Compaction of e-glass fabric preforms in the Vacuum Infusion Process, A: Characterization experiments“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40.4 (2009), S. 499 –510. ISSN: 1359-835X.





# A Herleitung Verformung

Mit den in 3.2 getroffenen Annahmen kann, nach [25], für die Durchbiegung der Membran der folgende Ansatz gemacht werden:

$$\xi(z, y) = f \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{2b}\right) \quad (\text{A.1})$$

Aus dem Ansatz geht hervor, dass die Durchbiegung in der Mitte der Membran am Stärksten ist und dem Biegepfel  $f$  entspricht. An den Rändern hingegen tritt keine Durchbiegung auf. Die Abb. A.1 veranschaulicht den Ansatz und zeigt die geometrischen Abmessungen, sowie die Lage des Koordinatensystems.

Die Verschiebungen in  $y$  und  $z$  Richtung können mit den Ansätzen

$$\eta(y, z) = c_1 \sin\left(\frac{\pi y}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{2b}\right) \quad (\text{A.2})$$

$$\zeta(y, z) = c_2 \cos\left(\frac{\pi y}{2a}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{b}\right) \quad (\text{A.3})$$

angegeben werden. Diese Ansätze erfüllen die Randbedingung, dass die Verschiebungen an den Rändern verschwinden müssen.

Die Spannungen in der Membran können mit

$$\sigma_y = \frac{2G}{\frac{1}{\nu-1}} \left( \frac{1}{\nu} \epsilon_y + \epsilon_z \right) \quad (\text{A.4})$$

$$\sigma_z = \frac{2G}{\frac{1}{\nu-1}} \left( \frac{1}{\nu} \epsilon_z + \epsilon_y \right) \quad (\text{A.5})$$

$$\tau_{yz} = G \gamma_{yz} \quad (\text{A.6})$$

angegeben werden.

Mit den Spannungen lässt sich die spezifische Formänderungsarbeit  $W^*$  aufstellen.

$$W_M^* = G \left( \frac{1}{\nu-1} (\epsilon_y^2 + \epsilon_z^2) + \frac{2}{\frac{1}{\nu}-1} \epsilon_y \epsilon_z + \frac{1}{2} \gamma_{yz}^2 \right) \quad (\text{A.7})$$

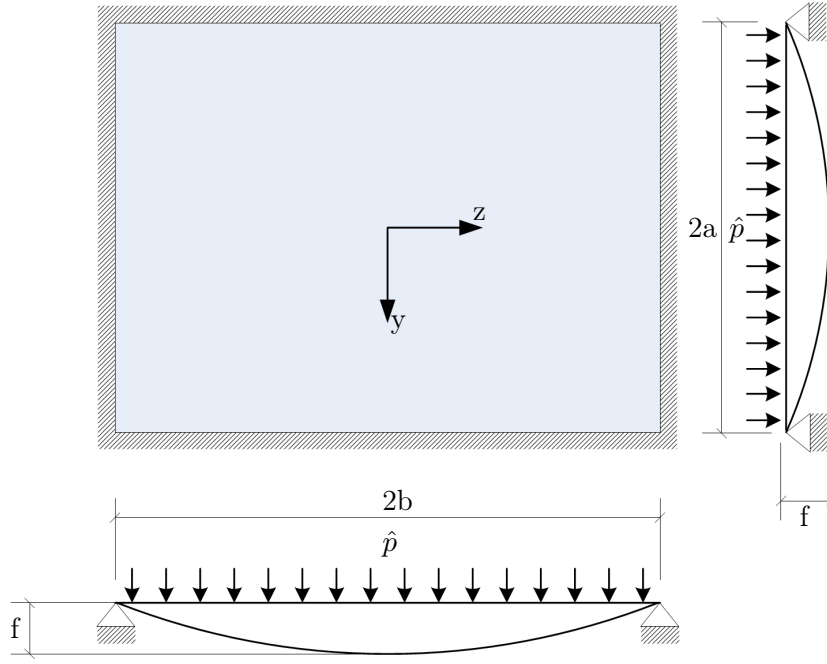


Abb. A.1: Mechanisches Ersatzmodell für die Ermittlung der Membranverformung

Somit gilt für die Formänderungsarbeit der gesamten Membran  $W$ :

$$W_M = \frac{Gt_m}{\frac{1}{\nu} - 1} \int \left\{ \frac{1}{\nu} (\epsilon_y^2 + \epsilon_z^2) + 2\epsilon_y\epsilon_z + \frac{\frac{1}{\nu} - 1}{2} \gamma_{yz}^2 \right\} dA \quad (\text{A.8})$$

Damit die Unbekannten  $f$ ,  $c_1$  und  $c_2$  (A.1 bis A.3) bestimmt werden können wird die aufgespeicherte Formänderungsarbeit  $W$  aus A.8 verwendet.

In die Gleichung A.8 sind die Dehnungen  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$

$$\epsilon_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (\text{A.9})$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \xi}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial \eta}{\partial z} \quad (\text{A.10})$$

und die Schubverformung  $\gamma_{yz}$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (\text{A.11})$$

einzusetzen. Das Ergebnis der Formänderungsarbeit ergibt sich hiermit zu:

$$W_M = \frac{t_m G}{\nu - 1} \left\{ \frac{f^4 \pi^4}{1024 a^2} \left[ -\frac{9}{\beta} - 9\beta^3 - 2\beta \right] + \frac{f^2 c_1 \pi^2}{12a} \left[ \frac{4}{\beta} + \beta - 3\beta\nu \right] + \frac{f^2 c_2 \pi^2}{12a} [1 - 3\nu + 4\beta^2] \right. \\ \left. + c_1^2 \pi^2 \left[ -\frac{1}{\beta} + \frac{\beta(\nu - 1)}{8} \right] + c_2^2 \pi^2 \left[ \frac{\nu - 1}{8\beta} - \beta \right] + c_1 c_2 \left[ -\frac{16(\nu + 1)}{9} \right] \right\} \quad (\text{A.12})$$

In der Gleichung A.12 ist das Seitenverhältnis durch  $\beta = \frac{a}{b}$  gegeben. Damit für die weiteren Berechnungen die Ergebnisse übersichtlich bleiben, werden noch die folgenden Abkürzungen eingeführt:

$$\begin{aligned} k_{A1} &= 9\pi^4(9\beta^4 + 2\beta^2 + 9) \\ k_{A2} &= 768\pi^2 a \beta (-4\beta^2 - 1) \\ k_{A3} &= 768\pi^2 a (\beta^2 - 4) \\ k_{A4} &= 1152\pi^2 a^2 (8\beta^2 + 1) \\ k_{A5} &= 1152\pi^2 a^2 (\beta^2 + 8) \end{aligned}$$

$$W_M = \frac{G t_m}{9216 a^2 \beta (\nu - 1)} \left[ -(c_1^2 k_{A5} + c_2^2 k_{A4} + f^2 (c_1 k_{A3} + c_2 k_{A2} + 2304 \pi^2 a \beta (c_2 + \beta c_1) \nu) + \right. \\ \left. + f^4 k_{A1} + 128 a^2 ((-9\pi^2 c_2^2 + 128 \beta c_1 c_2 - 9\pi^2 \beta^2 c_1^2) \nu + 128 \beta c_1 c_2)) \right] \quad (\text{A.13})$$

Die Unbekannten  $c_1$  und  $c_2$  können aus der virtuellen Gestaltänderung ermittelt werden. Die Ableitung der Formänderungsenergie nach  $c_1$  bzw.  $c_2$  muss Null sein, da eine Veränderung von  $c$  zu keiner Arbeitsleistung der Lasten führt.

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_M}{\partial c_1} &= 0 \\ 0 &= \frac{G t_m}{9216 a^2 \beta (\nu - 1)} \left[ -2c_1 k_{A5} - f^2 (k_{A3} + 2304 \pi^2 a \beta^2 \nu) - \right. \\ &\quad \left. - ((16384 a^2 \beta c_2 - 2304 \pi^2 a^2 \beta^2 c_1) \nu + 16384 a^2 \beta c_2) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial W_M}{\partial c_2} &= 0 \\ 0 &= \frac{Gt_m}{9216a^2\beta(\nu-1)}[-2c_2k_{A4} - f^2(k_{A2} + 2304\pi^2a\beta^2\nu) - \\ &\quad - ((16384a^2\beta c_1 - 2304\pi^2a^2c_2)\nu + 16384a^2\beta c_1)]\end{aligned}$$

Dieses Gleichungssystem wird nach  $c_1$  und  $c_2$  aufgelöst.

$$c_1 = \Phi_1(\nu, \beta) \frac{f^2}{a}$$

$$\begin{aligned}\Phi_1(\nu, \beta) &= \frac{\pi^2}{(\beta^2(k_{c1}\nu^2 + k_{c2} + k_{c3}\nu) + 648\pi^4(1-\nu)(\beta^4+1))} \cdot \\ &\quad \cdot [(81\pi^2 + 576)\beta^2\nu^2 + ((-648\pi^2 - 768)\beta^4 + \\ &\quad + (384 - 108\pi^2)\beta^2 - 108\pi^2)\nu + \\ &\quad + (216\pi^2 - 768)\beta^4 + (891\pi^2 - 192)\beta^2 + 108\pi^2]\end{aligned}$$

$$c_2 = \Phi_2(\nu, \beta) \frac{f^2}{a}$$

$$\begin{aligned}\Phi_2(\nu, \beta) &= \frac{\pi^2}{(\beta^2(k_{c1}\nu^2 + k_{c2} + k_{c3}\nu) + 648\pi^4(1-\nu)(\beta^4+1))} \cdot \\ &\quad \cdot [(81\pi^2 + 576)\beta^3\nu^2 + (-108\pi^2\beta^5 + \\ &\quad + (384 - 108\pi^2)\beta^3 + (-648\pi^2 - 768)\beta)\nu + \\ &\quad + 108\pi^2\beta^5 + (891\pi^2 - 192)\beta^3 + (216\pi^2 - 768)\beta]\end{aligned}$$

mit den Faktoren

$$\begin{aligned}k_{c1} &= 81\pi^4 - 4096 \\ k_{c2} &= 5265\pi^4 - 4096 \\ k_{c3} &= -162\pi^4 - 8192\end{aligned}$$

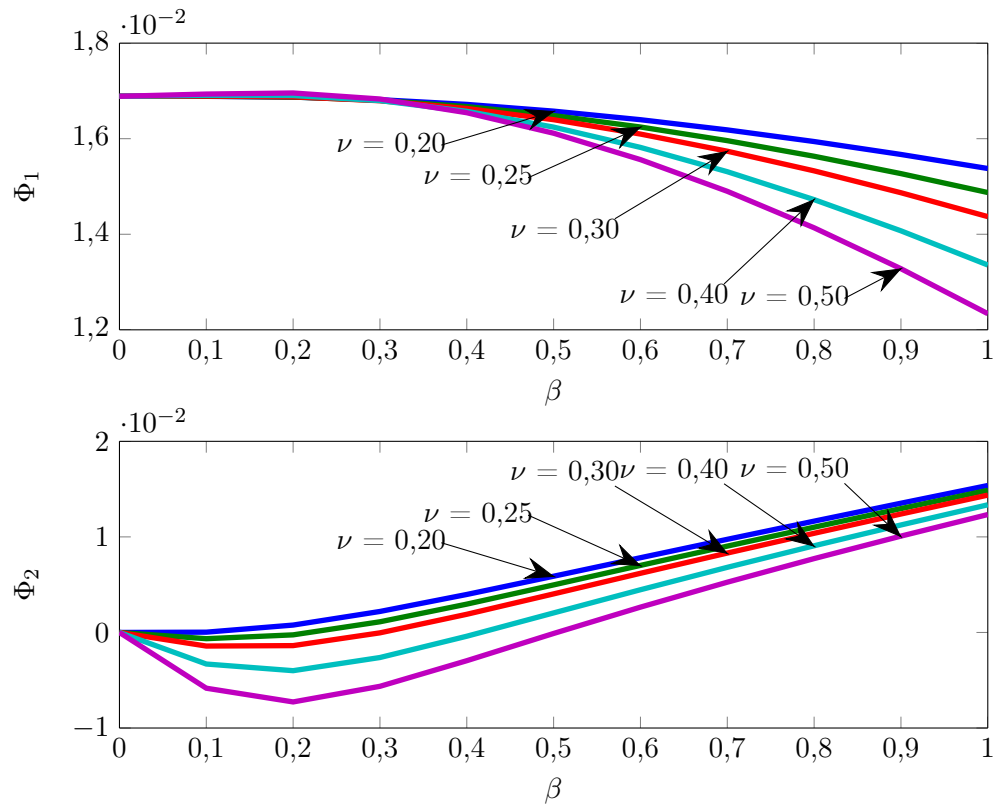


Abb. A.2: Die Faktoren  $\Phi_1$  und  $\Phi_2$  in Abhängigkeit der Querkontraktionszahl  $\nu$  und des Seitenverhältnisses  $\beta$

## A Herleitung Verformung

Die Faktoren  $\Phi_1$  und  $\Phi_2$  hängen lediglich von dem geometrischen Verhältnis  $\beta = \frac{a}{b}$  und von der materialabhängigen Querkontraktionszahl  $\nu$  ab. In der Abb. A.2 sind diese Abhängigkeiten dargestellt und es wird deutlich, dass  $\Phi_2$  bei einem Seitenverhältnis  $\beta = 0$  verschwindet. Damit existiert bei diesem Seitenverhältnis auch keine Verschiebung in z-Richtung. Für die Verschiebung in y-Richtung kann eine Unabhängigkeit von der Querkontraktionszahl angenommen werden, wenn das Seitenverhältnis kleiner ist als 0,2.

Da die beiden Verzerrungskonstanten  $c_1$  und  $c_2$  jetzt in Abhängigkeit des Biegepeils bekannt sind, kann der Biegepeil bestimmt werden. Die virtuelle Gestaltänderung führt jetzt zu einer Arbeit der äußeren Lasten  $\hat{p}$ .

$$\sum \tilde{W}_M \delta \tilde{s} = \hat{p} \delta f \int \xi(y, z) dA = \hat{p} \delta f \frac{16a^2}{\beta\pi^2} \quad (\text{A.14})$$

Somit ergibt sich:

$$\frac{\partial W}{\partial f} = \hat{p} \frac{16a^2}{\beta\pi^2} \quad (\text{A.15})$$

Aus dieser Gleichung folgen drei mögliche Lösungen für den Biegepeil. Hiervon sind zwei Lösungen imaginär und es existiert nur die reelle Lösung A.16.

$$f = \Theta_\beta(\nu, \beta) a \sqrt[3]{\frac{a\hat{p}}{hE}} \quad (\text{A.16})$$

mit

$$\Theta_\beta(\nu, \beta) = -\sqrt[3]{\frac{2^{13}(\nu^2 - 1)(k_{f1}\nu^2 + kf2\nu + k_{f3})}{\pi^2(k_{f4}\nu^3 + kf5\nu^2 + kf6\nu + k_{f7})}} \quad (\text{A.17})$$

$$\begin{aligned}
k_{f1} &= (81\pi^4 - 4096) \beta^2 \\
k_{f2} &= -648\pi^4 \beta^4 + (-162\pi^4 - 8192) \beta^2 - 648\pi^4 \\
k_{f3} &= 648\pi^4 \beta^4 + (5265\pi^4 - 4096) \beta^2 + 648\pi^4 \\
k_{f4} &= (20736\pi^2 + 147456) \beta^4 \\
k_{f5} &= (729\pi^4 - 110592\pi^2 - 233472) (\beta^6 + \beta^2) + (162\pi^4 - 34560\pi^2 + 40960) \beta^4 \\
k_{f6} &= (18432\pi^2 - 5832\pi^4) (\beta^8 + 1) + (-2754\pi^4 + 92160\pi^2 - 204800) (\beta^6 + \beta^2) + \\
&\quad + (-11988\pi^4 + 458496\pi^2 + 163840) \beta^4 \\
k_{f7} &= (5832\pi^4 - 18432\pi^2) (\beta^8 + 1) + (48681\pi^4 - 165888\pi^2 + 28672) (\beta^6 + \beta^2) + \\
&\quad + (22194\pi^4 - 149760\pi^2 + 270336) \beta^4
\end{aligned}$$

In der Abb. A.3 ist der Faktor  $\Theta$  in Abhängigkeit der Querkontraktionszahl und des Seitenverhältnisses abgebildet. Bis zu einem Seitenverhältnis von 0,2 kann der Faktor als annähernd konstant angenommen werden und die Abhängigkeit von der Querkontraktionszahl ist nur schwach vorhanden. Hieraus und aus der Abb. A.4 folgt auch, dass der Biegepfel bei kleineren Seitenverhältnissen als 0,2 sich nur noch schwach verändert.

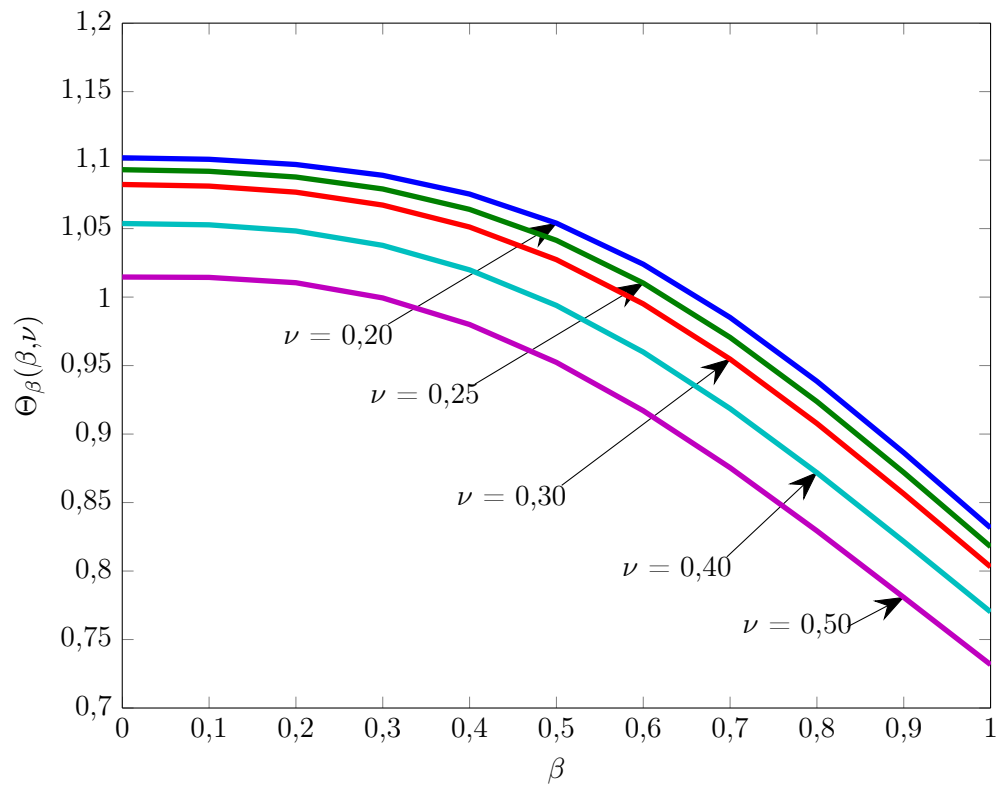


Abb. A.3: Der Faktor  $\Theta_\beta(\beta, \nu)$  in Abhängigkeit der Querkontraktionszahl und des Seitenverhältnisses ( $\Theta_\beta(\beta = 0, \nu) = \Theta(\nu)$ ) (Gleichung siehe Anhang A)



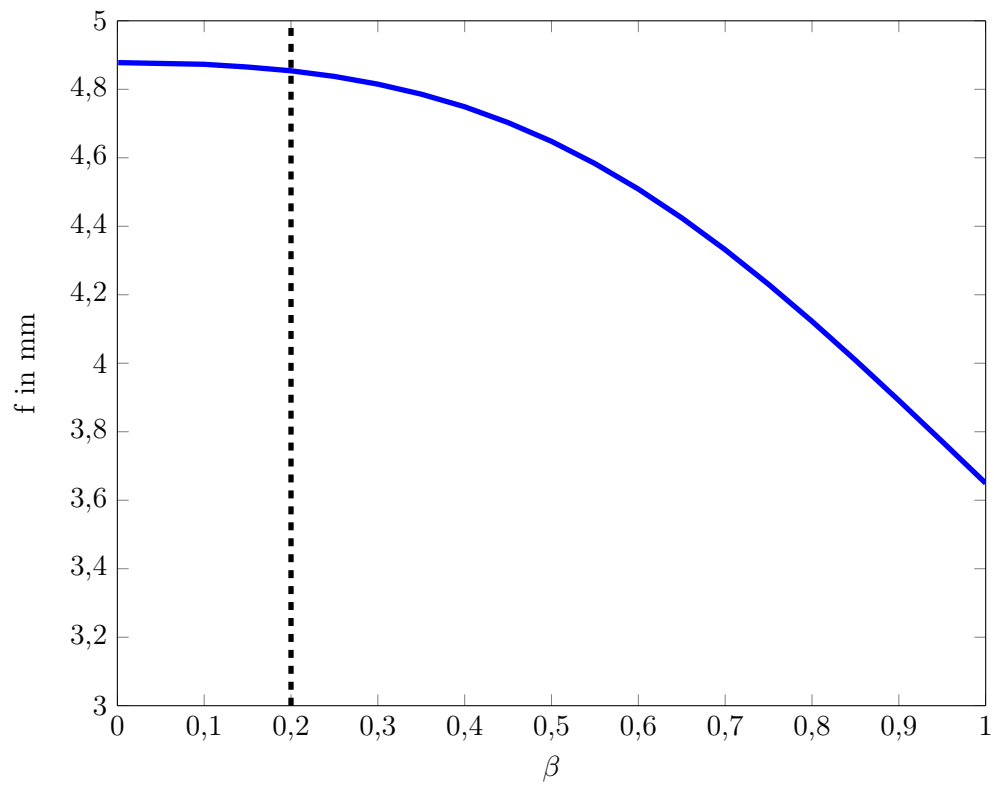


Abb. A.4: Der Biegepfel  $f$  in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses  $\beta$ , für eine Membran mit  $E = 2700 \text{ N/mm}^2$ ,  $t_m = 0,05 \text{ mm}$ ,  $\nu = 0,25$ ,  $\hat{p} = 0,075 \text{ N/mm}^2$



## B Spannung Membran

Nach Volkersen [62] gilt für die Spannung an der Einspannung der Membran:

$$\sigma = \frac{4\pi E}{1 - \nu^2} \left( \frac{\pi}{8} - \frac{a}{b} \phi_{\sigma 2} \right) \left( \frac{f}{2a} \right)^2$$

mit

$$\phi_{\sigma 2} = \frac{\frac{b}{a} k_{\sigma 2} k_{\sigma 3} - k_{\sigma 1} k_{\sigma 5}}{k_{\sigma 3} k_{\sigma 4} - k_{\sigma 5}^2}$$

und

$$\begin{aligned} k_{\sigma 1} &= \frac{\pi^2}{6} \left( 2 \frac{a}{b} + \frac{1 - 3\nu}{2} \frac{b}{a} \right) \\ k_{\sigma 2} &= \frac{\pi^2}{6} \left( 2 \frac{b}{a} + \frac{1 - 3\nu}{2} \frac{a}{b} \right) \\ k_{\sigma 3} &= 2\pi^2 \left( \frac{a}{b} + \frac{1 - \nu}{8} \frac{b}{a} \right) \\ k_{\sigma 4} &= 2\pi^2 \left( \frac{b}{a} + \frac{1 - \nu}{8} \frac{a}{b} \right) \\ k_{\sigma 5} &= \frac{16}{9} (1 + \nu) \end{aligned}$$

Für die Annahme eines Membranstreifens gilt  $b \rightarrow \infty$  und damit folgt für die Spannung:

$$\sigma = - \frac{\pi(3\pi - 4)f^2 E}{24a^2(\nu^2 - 1)}$$



## C Abschätzung des Strömungszustands

Wie bereits erwähnt, ist die Rohrreibungszahl  $\lambda$  von der Reynoldszahl abhängig. Für typische Infusionsharze kann eine dynamische Viskosität  $\mu$  von ca. 250 mPas und eine Dichte von  $1,13 \frac{g}{cm^3}$  angenommen werden.

Für die Reynoldszahl  $Re$  bzw. für die mittlere Geschwindigkeit kann unter Berücksichtigung des hydraulischen Radiuses

$$Re = \frac{v_m 4 r_{Hyd}}{\frac{\mu}{\rho}} \quad (C.1)$$

$$v_m = \frac{Re \mu}{4 \rho r_{Hyd}} \quad (C.2)$$

geschrieben werden.

In der Abb. C.1 ist der hydraulische Radius  $r_{Hyd}$  und die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Differenzdrucks  $\hat{p}$  dargestellt. Die blau dargestellte Fläche im unteren Bildteil zeigt den Bereich mit laminarer Strömung, da hier die ermittelte Reynoldszahl kleiner ist als 2300. Als Grundlage für diese Berechnung gilt die Dimensionierung aus Kapitel 3.3.

Aus Abb. C.1 folgt, dass für typische Fließfrontgeschwindigkeiten von  $v_m \ll 0,5 \frac{m}{s}$  eine laminare Strömung angenommen werden kann.

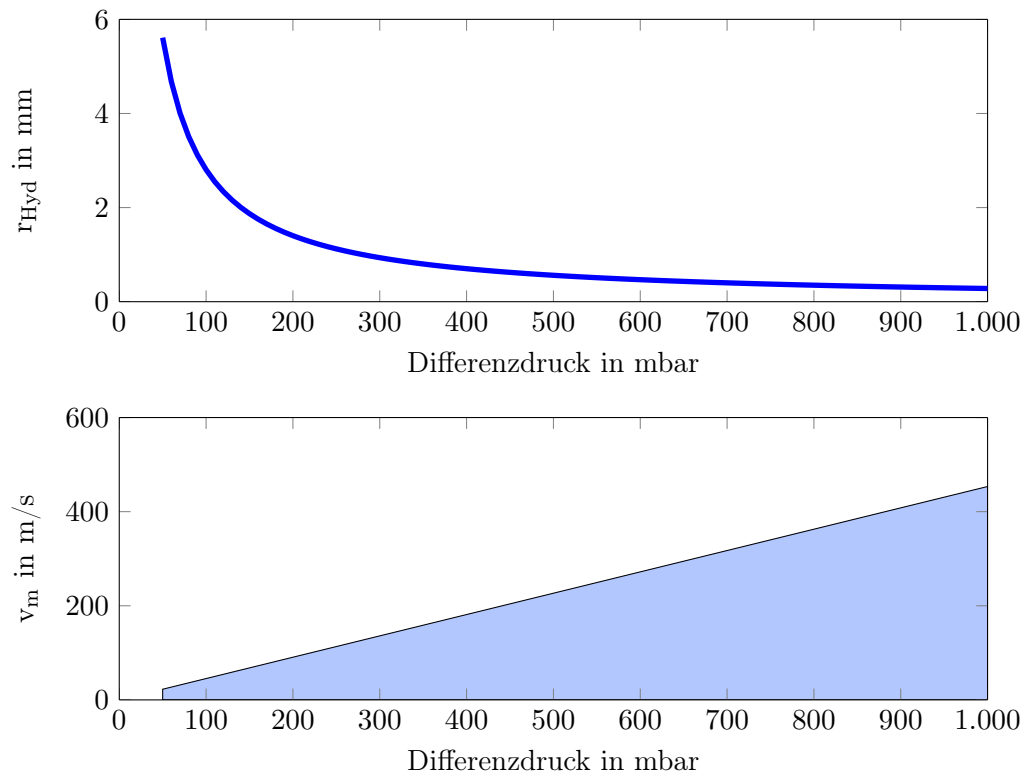


Abb. C.1: Fließgeschwindigkeit für eine Reynoldszahl von  $Re=2300$  (blauer Bereich laminare Strömung)

## D Versuchsdaten Faserondulation im Kanalbereich

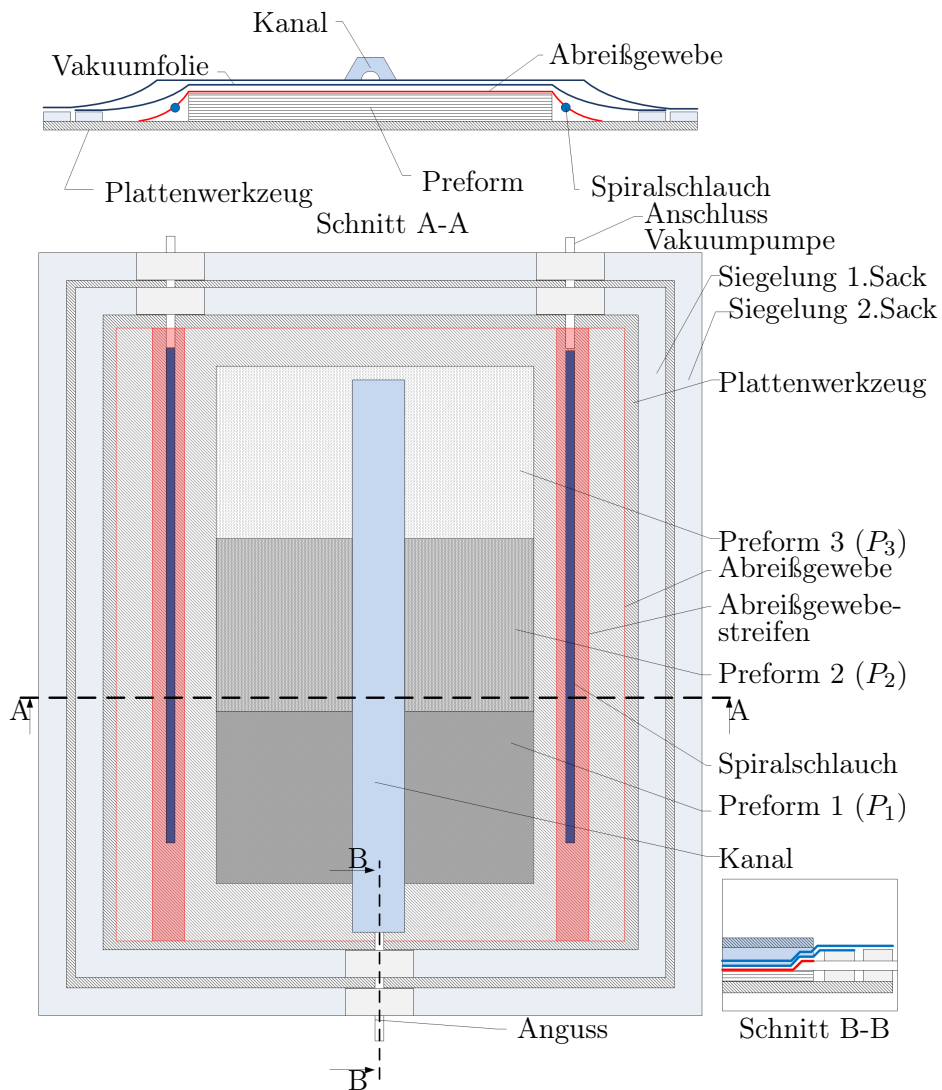


Abb. D.1: Fertigungsaufbau für die Ermittlung des Kanalabdrucks

Tabelle D.1: Prozessparameter für die Plattenherstellung

Druck in der Kavität vor der Infusion	Druck im Kanal	Werkzeugtemperatur	Anfangstemperatur Harz im Vorratsbehälter
ca. 10 mbar	ca. 250 mbar	ca. 50°C	Raumtemperatur(22°C)

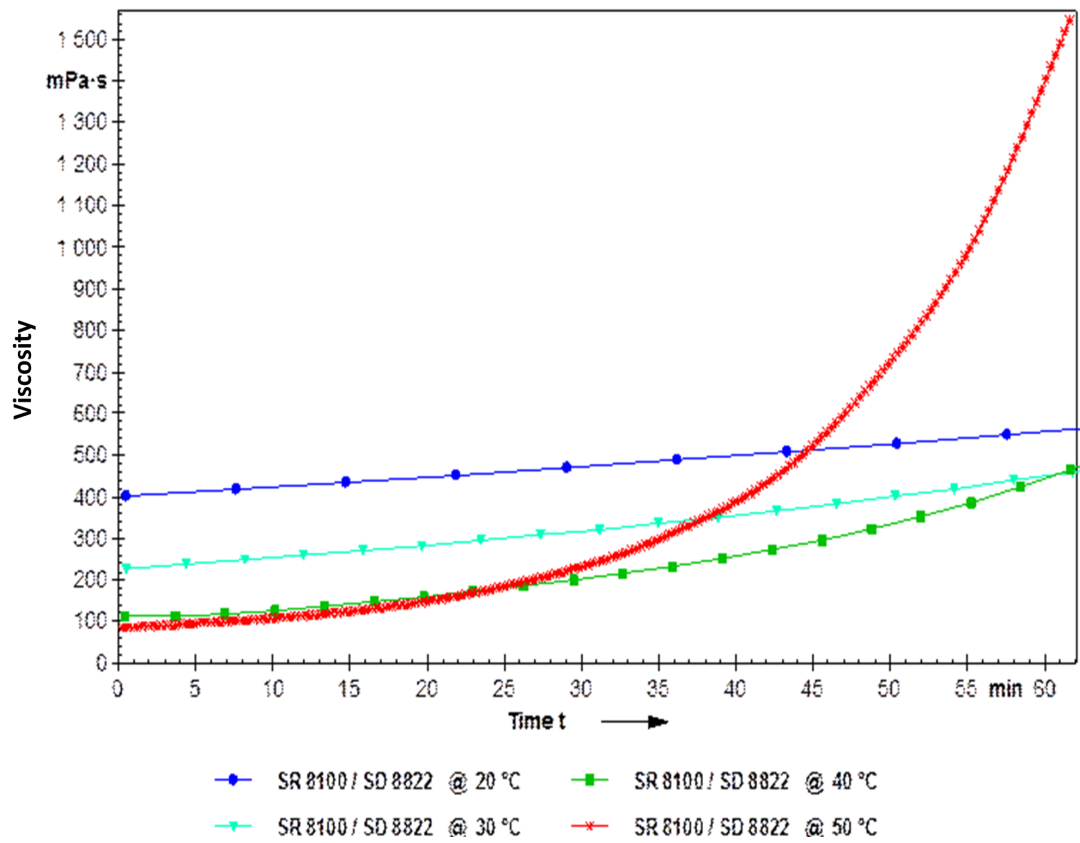


Abb. D.2: Viskositätsverlauf des Epoxidharzes Sicomin SR8100/ SD8822 in Abhängigkeit der Zeit



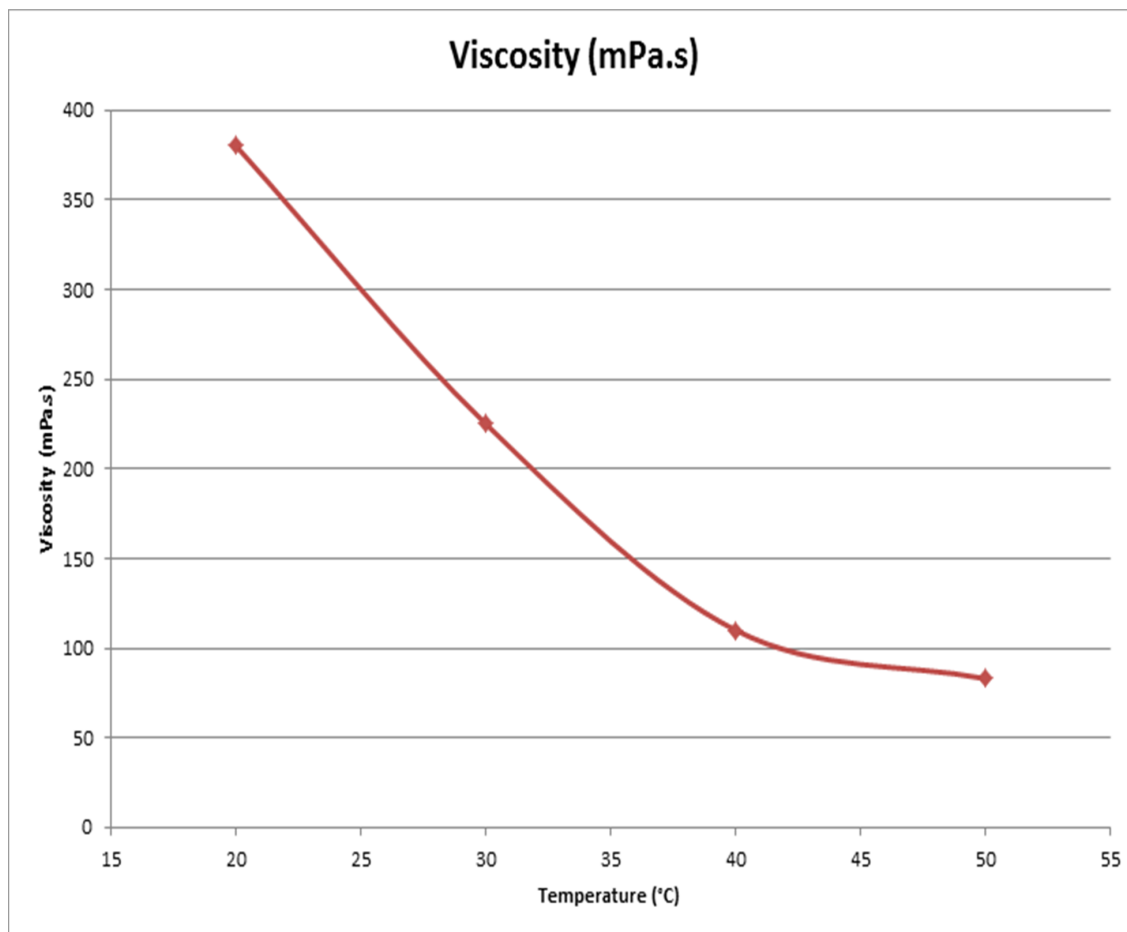


Abb. D.3: Viskositätsverlauf des Epoxidharzes Sicomin SR8100/ SD8822 in Abhängigkeit der Temperatur. Die Anfangsviskosität beträgt 80mPas (bei 50°C).

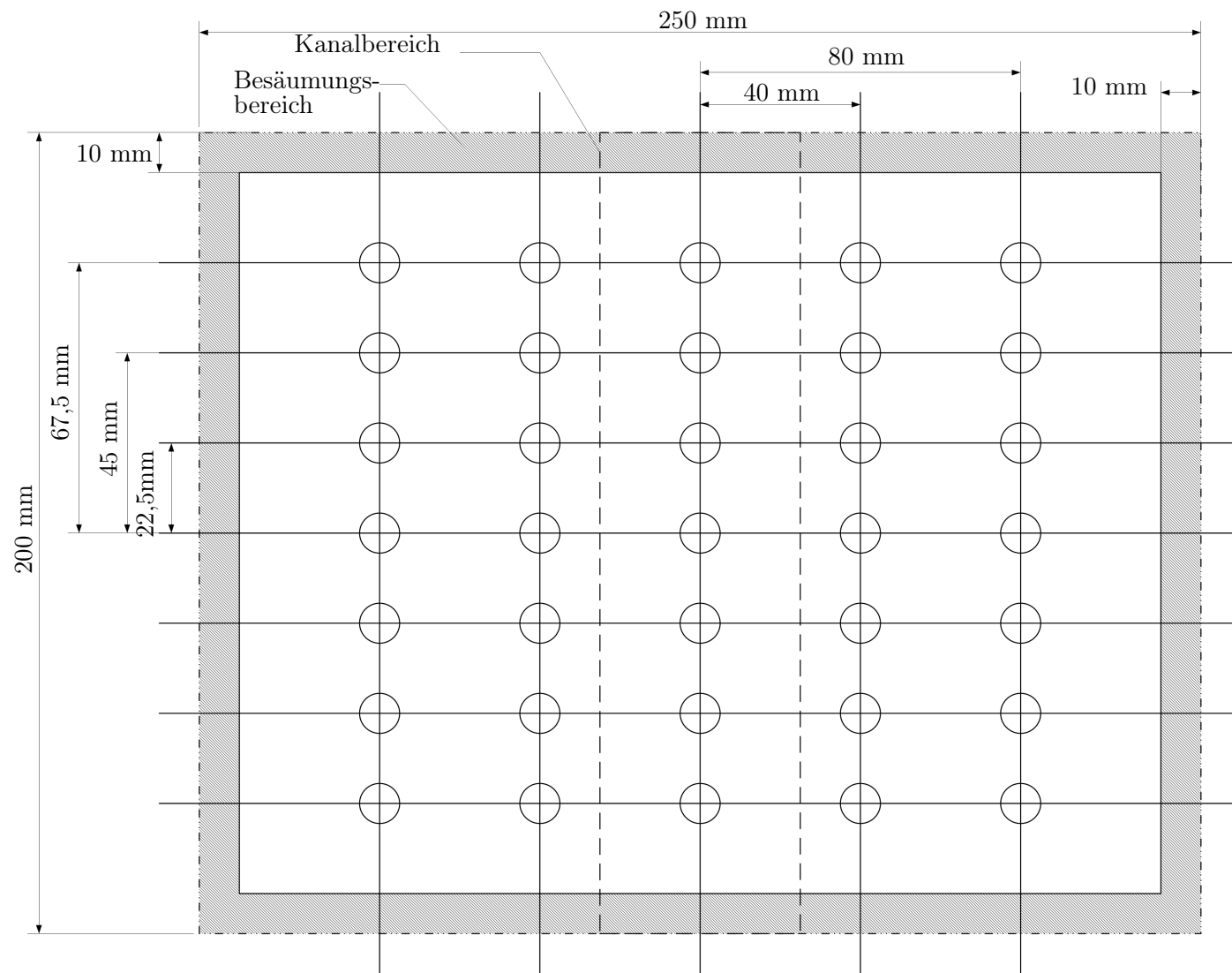


Abb. D.4: Messpunkte der taktilen Vermessung



## E Technische Datenblätter

## Fasermaterial

**TIME OUT**  
Composites info  
EBX-0407-FM1270  
E-Glas +45°/-45° Diagonal- oder BiAxialgelege, 407g/m<sup>2</sup>  
Aktualisiert am 05/07/2016  
Seite 1 / 1

## TECHNISCHES DATENBLATT

### EBX-0407-FM1270

E-Glas +45°/-45° Diagonal- oder BiAxialgelege, 407g/m<sup>2</sup>

Faser-Konstruktion	Vernähtung
Fasertyp: E-Glas Lagenrichtung: +45°/-45° Faser-Gewicht: 407g/m <sup>2</sup> ±4,5%	Nahfaden: Texturiertes Polyester Nah-Direx: 75 gg Nah-Indirex: 75 gg Nah-Länge: 2,5mm Nahart: Pliar Nahgewicht: 7 g/m <sup>2</sup>

Lagen-Konstruktion
-45 Fasertyp: E-Glas Tex-Zahl: 300 tex Fadendicke: 12 gg Faser-Gewicht: 200 g/m <sup>2</sup> +45 Fasertyp: E-Glas Tex-Zahl: 300 tex Fadendicke: 12 gg Faser-Gewicht: 200 g/m <sup>2</sup>

MÖGLICHE KUNDEN-SPEZIFISCHE ANPASSUNGEN
KUNDENCODE UND BESCHREIBUNG
GELIEGE-BREITE
KENNFADEN / VERKÜNGTE KANTEN
KUNDEN-SPEZIFIZIERT
ROLLENGEWICHT / LÄNGE
KUNDEN-SPEZIFIZIERT
PAPPROLLE
KUNDEN-SPEZIFIZIERT

Hersteller / Produktion spezifiziert nach

Bitte beachten Sie:  
Wir übernehmen keine Haftung für Schäden, die aus der Verwendung unserer Produkte resultieren. Unsere Produkte sind als Hilfsmittel zur Verstärkung von Strukturen vorgesehen. Die Verwendung unserer Produkte ist ausschließlich nach den technischen Zeichnungen und den Angaben in den technischen Datenblättern zulässig. Die Verantwortung für die Konstruktion und die Ausführung der Verstärkung liegt bei dem Anwender. Unsere Produkte sind nicht für den Einsatz in sicherheitskritischen Bereichen geeignet. Die Verwendung unserer Produkte ist ausschließlich nach den technischen Zeichnungen und den Angaben in den technischen Datenblättern zulässig. Die Verantwortung für die Konstruktion und die Ausführung der Verstärkung liegt bei dem Anwender. Unsere Produkte sind nicht für den Einsatz in sicherheitskritischen Bereichen geeignet.

**TIME OUT Composite info**  
Tel: +49 (0) 22 27 / 90 81 0  
service@timeout.de  
D-53332 Bornheim-Sieften  
www.timeout.de

**TIME OUT**  
Composites info  
EUD-0597-FM1270  
E-Glas Uni-Direktionalgelege, 600g/m<sup>2</sup>  
Aktualisiert am 05/07/2016  
Seite 1 / 1

## TECHNISCHES DATENBLATT

### EUD-0597-FM1270

E-Glas Uni-Direktionalgelege, 600g/m<sup>2</sup>

Faser-Konstruktion	Vernähtung
Fasertyp: E-Glas Lagenrichtung: 0° Faser-Gewicht: 607g/m <sup>2</sup> ±4,5%	Nahfaden: Texturiertes Polyester Nah-Direx: 75 gg Nah-Indirex: 75 gg Nah-Länge: 3,33mm Nahart: Trikot Nahgewicht: 6 g/m <sup>2</sup>

Lagen-Konstruktion
0 Fasertyp: E-Glas Tex-Zahl: 2400 tex Fadendicke: 6 gg Faser-Gewicht: 300 g/m <sup>2</sup> 90 Fasertyp: E-Glas Tex-Zahl: 135 tex Fadendicke: 4,3 gg Faser-Gewicht: 24 g/m <sup>2</sup>

MÖGLICHE KUNDEN-SPEZIFISCHE ANPASSUNGEN
KUNDENCODE UND BESCHREIBUNG
GELIEGE-BREITE
KENNFADEN / VERKÜNGTE KANTEN
KUNDEN-SPEZIFIZIERT
ROLLENGEWICHT / LÄNGE
KUNDEN-SPEZIFIZIERT
PAPPROLLE
KUNDEN-SPEZIFIZIERT

Hersteller / Produktion spezifiziert nach

Bitte beachten Sie:  
Wir übernehmen keine Haftung für Schäden, die aus der Verwendung unserer Produkte resultieren. Unsere Produkte sind als Hilfsmittel zur Verstärkung von Strukturen vorgesehen. Die Verwendung unserer Produkte ist ausschließlich nach den technischen Zeichnungen und den Angaben in den technischen Datenblättern zulässig. Die Verantwortung für die Konstruktion und die Ausführung der Verstärkung liegt bei dem Anwender. Unsere Produkte sind nicht für den Einsatz in sicherheitskritischen Bereichen geeignet. Die Verwendung unserer Produkte ist ausschließlich nach den technischen Zeichnungen und den Angaben in den technischen Datenblättern zulässig. Die Verantwortung für die Konstruktion und die Ausführung der Verstärkung liegt bei dem Anwender. Unsere Produkte sind nicht für den Einsatz in sicherheitskritischen Bereichen geeignet.

**TIME OUT Composite info**  
Tel: +49 (0) 22 27 / 90 81 0  
service@timeout.de  
D-53332 Bornheim-Sieften  
www.timeout.de

**Produktdaten**

Artikelnummer:	HP-B415C
Bezeichnung:	Diagonal-Carbon-Geläge
Faserorientierung:	+45°/-45°

**Technische Spezifikation**

Konstruktion	Flächengewicht [g/m²]	Toleranz [%]	Material
0°			
-45°	203	5	HT-Faser 50K Carbon
90°			
45°	203	5	HT-Faser 50K Carbon
CSM			
Nähtypen	4	5	PES

Gesamtflächengewicht	410	5	g/m²
Nahbindung	Tricot		
Nahtheit	5		

**Auflage**

Länge:	50	mm	± 2%
Breite:	127	cm	± 2%

**Verpackung**

Flüssigkeitsdurchmesser:	76	mm	Innen
Folie:	LOPE	transparent	

Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verbindlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

**Produktdaten**

Artikelnummer:	HP-B800C
Bezeichnung:	Diagonal-Carbon-Geläge
Faserorientierung:	+45°/-45°

**Technische Spezifikation**

Konstruktion	Flächengewicht [g/m²]	Toleranz [%]	Material
0°			
-45°	300	5	HT-Faser 80K Carbon
90°			
45°	300	5	HT-Faser 80K Carbon
CSM			
Nähtypen	5	5	PES

Gesamtflächengewicht	605	5	g/m²
Nahbindung	Fransen		
Nahtheit	5		

**Auflage**

Länge:	50	mm	± 2%
Breite:	127	cm	± 2%

**Verpackung**

Flüssigkeitsdurchmesser:	76	mm	Innen
Folie:	LOPE	transparent	

Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verbindlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

Technisches Datenblatt  
HP-B600E

HP-TeXtiles  
...light to dark transition

#### Produktbezeichnung

Artikelnummer	HP-B600E
Bezeichnung	Bidupinal Glas-Gelege
Faserdichtung	445°/7,45°

#### Technische Spezifikation

Konstruktion	Flächengewicht [g/m²]	Toleranz [%]	Material
0°		5	E-Glas
-45°	300	5	E-Glas
90°		5	E-Glas
445°	300	5	E-Glas
CSM		5	E-Glas
Nähtäden	6	5	PES

Gesamtfächengewicht	606	g/m²
Nahbindung	Fränse	
Nahtheinheit	5	

#### Auflagezeichnung

Länge	40	mm	± 2%
Breite	127	cm	± 2%

#### Vorzeichnung

Hülserdurchmesser	76	mm	innen
Folie	LDPE	transparent	

Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verantwortlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

HP-TeXtiles - Otho-Hahn-Str. 22 - D-48480 Schaper - Tel. +49 (0) 5905-94 598 70 - Fax +49 (0) 5905-94 598 74  
[www.hp-texiles.com](http://www.hp-texiles.com)  
[info@hp-texiles.com](mailto:info@hp-texiles.com)  
 Revision 07/2010

Technisches Datenblatt  
HP-P400C

HP-TeXtiles  
...light to dark transition

#### Produktbezeichnung

Artikelnummer	HP-P400C
Bezeichnung	Carbongewebe

#### Technische Spezifikation

Flächengewicht	400	g/m²	± 5%
Leinwand			ISO 3374/2000
Bindung			ISO 2113/1996
Leitfähigkeit	12K-800	Tex / HT-Faser	ISO 4602/1997
Kettendichte	2,5	Furcm	± 2%
Schussdichte	12K-800	Tex / HT-Faser	ISO 4602/1997
	2,5	Furcm	± 2%
Dicke	0,40	mm	± 5%
			ISO 4603/1993

#### Auflagezeichnung

Länge	60	mm	± 2%
Breite	100	cm	± 2%

#### Vorzeichnung

Hülserdurchmesser	76	mm	innen
Folie	LDPE	transparent	

Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach besten Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verantwortlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

HP-TeXtiles - Otho-Hahn-Str. 22 - D-48480 Schaper - Tel. +49 (0) 5905-94 598 70 - Fax +49 (0) 5905-94 598 74  
[www.hp-texiles.com](http://www.hp-texiles.com)  
[info@hp-texiles.com](mailto:info@hp-texiles.com)  
 Revision 07/2010



**Produktbezeichnung**

Artikelnummer	HP-P401E
Bezeichnung	Glasoxingewebe

**Technische Spezifikation**

Flächengewicht	400 g/m <sup>2</sup>	±5%	ISO 337 4:2000
Bindung	Lerwand		
Kettfäden	600 Tex		
Kettichte:	3,3 Fd/cm	±2%	
Schussfäden:	900 Tex		
Schussichte:	2,3 Fd/cm	±2%	
Finish / Schlichte:	Slane		

**Auflage**

Länge	60 m	±2%
Breite	150 cm	±2%

**Verpackung**

Hülsendurchmesser	76 mm	innen
Falle	LDPE	transparent

Die Angaben in diesem Produktendatenblatt sind nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem aktuellen Erkenntnisstand. Eine Gewährleistung kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

HP-TeXtiles - Otto-Hahn-Str. 22 - D-48480 Schöppen - Tel. +49 (0) 5905 94 598 70 - Fax +49 (0) 5905 94 598 74  
[www.hp-texiles.com](http://www.hp-texiles.com) [info@hp-texiles.com](mailto:info@hp-texiles.com) Revision 07/2010



**Produktbezeichnung**

Artikelnummer	HP-T160C
Bezeichnung	Carbongewebe

**Technische Spezifikation**

Flächengewicht	160 g/m <sup>2</sup>	±5%	ISO 337 4:2000
Bindung	Köper 2/2		ISO 2113/1996
Kettfäden:	3K-200 Tex / Hf-Faser		ISO 4602/1997
Kettichte:	4 Fd/cm	±2%	ISO 4602/1997
Schussfäden:	3K-200 Tex / Hf-Faser		ISO 4602/1997
Schussichte:	4 Fd/cm	±2%	ISO 4602/1997
Dicke:	0,16 mm	±5%	ISO 4603/1993

**Auflage**



Länge	100 m	±2%
Breite	100 cm	±2%

**Verpackung**

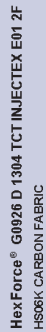
Hülsendurchmesser	76 mm	innen
Falle	LDPE	transparent

Die Angaben in diesem Produktendatenblatt sind nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem aktuellen Erkenntnisstand. Eine Gewährleistung kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

HP-TeXtiles - Otto-Hahn-Str. 22 - D-48480 Schöppen - Tel. +49 (0) 5905 94 598 70 - Fax +49 (0) 5905 94 598 74  
[www.hp-texiles.com](http://www.hp-texiles.com) [info@hp-texiles.com](mailto:info@hp-texiles.com) Revision 07/2010

<div>Technisches Datenblatt HP-T163E</div> <div></div>	<div>Technisches Datenblatt HP-T240C</div> <div></div>
<b>Produktbezeichnung</b>	<b>Produktbezeichnung</b>
Artikelnummer: HP-T163E	Artikelnummer: HP-T240C
Bezeichnung: Glasfaserngewebe	Bezeichnung: Carbongewebe
<b>Technische Spezifikation</b>	<b>Technische Spezifikation</b>
Flächengewicht: 166 g/m² ± 5%	Flächengewicht: 245 g/m² ± 5%
Bindung: Köper 2/2	Bindung: Köper 2/2
Kettfäden: E3-68 Tex	Kettfäden: 3K-200 Tex / HT-Faser
Keilfäden: 12 Fd/cm ± 2%	Keilfäden: 6 Fd/cm ± 2%
Kettfäden: E3-68 Tex	Kettfäden: 3K-200 Tex / HT-Faser
Schussfäden: 11,5 Fd/cm ± 2%	Schussfäden: 6 Fd/cm ± 2%
Zugfestigkeit Kette: 980 N/5cm	Dicke: 0,35 mm ± 5%
Zugfestigkeit Schuss: 890 N/5cm	
Finish / Schlichte: Silane	
<b>Aufmachung</b>	<b>Aufmachung</b>
Länge: 100 m	Länge: 100 m
Breite: 100 cm	Breite: 100 cm
<b>Versandung</b>	<b>Versandung</b>
Hülsendurchmesser: 76 mm innen	Hülsendurchmesser: 76 mm innen
Folie: LDPE transparent	Folie: LDPE transparent
Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verbindlichkeit an den Hersteller jedoch nicht angelehnt werden.	Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verbindlichkeit an den Hersteller jedoch nicht angelehnt werden.
HP-TeXtiles - Otto-Hahn-Str. 22 - D-48480 Schaper - Tel: +49 (0) 5905 94 598 70 - Fax: +49 (0) 5905 94 598 74 <a href="http://www.hp-textiles.com">www.hp-textiles.com</a>	HP-TeXtiles - Otto-Hahn-Str. 22 - D-48480 Schaper - Tel: +49 (0) 5905 94 598 70 - Fax: +49 (0) 5905 94 598 74 <a href="http://www.hp-textiles.com">www.hp-textiles.com</a>
Revision 07/2010	Revision 07/2010





### Product Data

## Textile Reinforcement for High Performance Composite

Hexforce® reinforcements are available in a range of weave styles – from woven fabrics to multiaxials and specialities that offers a range of globally certified aerospace / industrial products in carbon, glass and aramid and specialty fibers that we sell under the Hexforce® trademark.

DESCRIPTION	May / 2016
Type of yarns	Warp : TENAX E HTA 40 E13 BK Weft : TENAX E HTA 40 E13 BK
Nominal weight	375 g/m <sup>2</sup> 11.06 oz/yd <sup>2</sup>
Weave style	5H SATIN
Width	1304 mm 51.3 in
Finish type	E01 2F
Finish description	
Powder type	Epoxy powder
Powder designation	Epoxy Powder E01 2.5% per side

Nominal construction	Warp : 4 yarn/cm Weft : 4.8 picks/cm	11.8 yarn/in 11.8 picks/in
Weight distribution	Warp : 50 % Weft : 50 %	
Thickness (")	0.38 mm	0.01 in

### Other Informations

TRACERSwap &amp; Well

\*NB : The above average values are obtained with epoxy laminate at 55% of fibres in volume.

**IMPORTANT**

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms.

© Copyright Hessel



For European sales office telephone numbers and a full address list, please go to : <http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>

Technisches Datenblatt  
**HP-T240CE**Produktkennung

Artikelnummer:	HP-T240CE
Bezeichnung:	Carbonowebe

### Technische Spezifikation

Fickengewicht	245	g/m <sup>2</sup>	± 5%
Bindung	Köper 22		
Kettendruck	3K/200	Tex / HT-Faser	
Kettweite	6	Förm	± 2%
Schussfaden	3K/200	Tex / HT-Faser	
Schussdicke	6	Förm	± 2%
Dicke	0,35	mm	± 5%
EF Binder	10-15	g/m <sup>2</sup>	± 5%

Aufmachung

Länge:	100	lftm	± 2%
Breite:	100	cm	± 2%

Verpackung

Hülsendurchmesser:	76	mm	innen
Ende:	NPF	transparent	

Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verbindlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

HP-Textiles ~ Otto-Hahn-Str. 22 ~ D-48480 Schapen ~ Tel.: +49 (0) 5905-94 598 70 ~ Fax: +49 (0) 5905-94 598 74

Revision 07/2010

SCOMIN  
COMPOSITES

COMPOSITE SOLUTIONS

## Technisches Datenblatt

### SR 8100 Epoxy-System für Injektion und Infusion

#### Beschreibung

- ▲ Zweikomponentiges Epoxid-System
- ▲ Spezial für Horizontal-Prozesse wie z. B. Injektion oder Infusion entwickelt
- ▲ Sehr geringe Viskosität bei Raumtemperatur
- ▲ Hohe mechanische Festigkeit
- ▲ Hohe mechanische Eigenschaften
- ▲ Temperaturbeständigkeit von über 80°C [T<sub>g</sub>]
- ▲ Zertifiziert nach Germanischer Lloyd (Approval No. WP 0320006 HH)

#### Eigenschaften

Produkt	SR 8100	SD 8822	SD 8822/SD 8824 50/50 nach Gewicht	SD 8824 8100
Erkennung	flüssig	flüssig	flüssig	flüssig
Farbe	gelb	farblos	farblos	hellgelb
Reaktivitäts-Typ		langsam	normal	standard
Viskosität @ 10°C (Pa·s)				
bei 15°C	2370 ± 100	27	12	7
bei 20°C	1.320 ± 100	20	9	6
bei 25°C	785 ± 100	16	8	5
bei 30°C	490 ± 50	13	7	4
bei 40°C	220 ± 50	9	5	3
Dichte @ 16°C (g/cm³)				
@ 20°C	1.158 ± 0.01	0.937 ± 0.01	0.942 ± 0.01	0.944 ± 0.01
Lagerung	24 Monate kristallisiert nicht			

⊗ Rheometre CP 50 mm Gradient-Vitesse 10 s<sup>-1</sup>, ⊗ Parameter NF EN ISO 2811-1

#### Eigenschaften der Mischung

Produkt	SR 8100	SD 8822	SD 8822/SD 8824 50/50 nach Gewicht
Viskosität @ 10°C (Pa·s)			
@ 20°C	990 ± 100	340 ± 100	300 ± 100
@ 25°C	340 ± 100	310 ± 100	285 ± 100
Mischverhältnis			
nach Gewicht	100 g / 31 g	100 / 26 g	100 g / 22 g
nach Volumen	100 ml / 39 ml	100 / 32 ml	100 ml / 27 ml

⊗ Rheometre CP 50 mm Gradient-Vitesse 10 s<sup>-1</sup>

### Mechanische Eigenschaften



Reaktivität der Mischung SR 8100 / SD 8822

	8100 / 8822	8100 / 8822-8824	8100 / 8824
Exotherme Temperatur einer 500g-Mischung (°C)			
bei 20°C	125	>210	>210
bei 25°C	205	>210	>210
Zeit bis zum Erreichen der Exothermie einer 500g-Mischung			
bei 20°C	7h20'	2h05'	1h27'
bei 25°C	2h51'	1h24'	54'
Zeit zum Erreichen von 50°C einer 500g-Mischung			
bei 20°C	6h08'	1h55'	1h21'
bei 25°C	2h28'	1h13'	46'

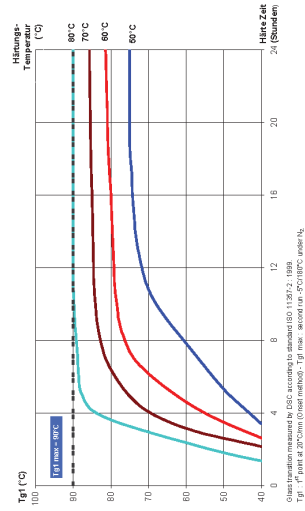
Polymerisation bei Heispressung

	SD 8822	SD 8824
Gelierzit der Heimischung		
@ 40 °C	2h33'	1h27'
@ 60 °C	56'	26'
@ 80 °C	23'	10'

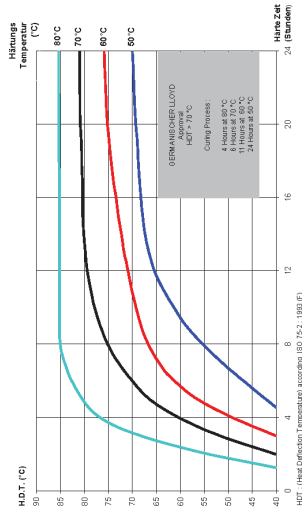
Gebindegrößen

	Harz SR 8100	Härter SD 8822	Härter SD 8824
4 x 1000 kg			650 kg
3 x 1000 kg		950 kg	
1000 kg	2 x 155 kg	2 x 155 kg	220 kg
200 kg	2 x 31 kg	2 x 31 kg	44 kg
100 kg	2 x 15,5 kg	2 x 15,5 kg	22 kg
50 kg	2 x 7,75 kg	2 x 7,75 kg	11 kg
12 kg	3,72 kg	3,72 kg	2,64 kg
5,6 kg	1,73 kg	1,73 kg	1,23 kg
2 kg	0,7 kg	0,7 kg	0,49 kg

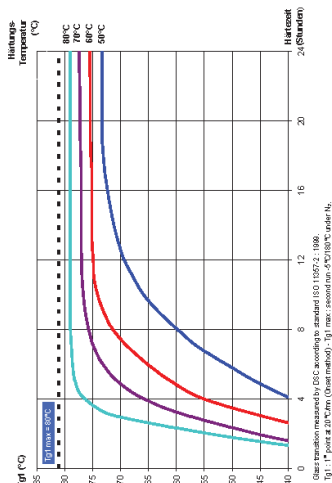
Epoxidharzsystem SR 8100 / SD 8822  
Verhältnis Glasübergangtemperatur (Tg1) zu Härtings-Temperatur / Zeit



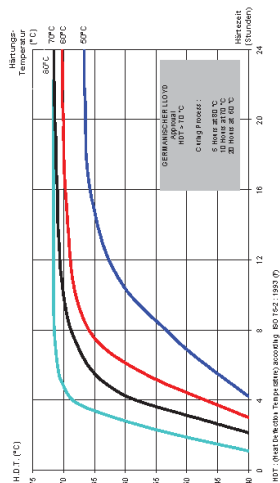
Epoxidharzsystem SR 8100 / SD SD 8822  
Wärmeformbeständigkeitstemperatur



# Epoxidharzsystem SR 8100 / SD 8824 Verhältnis Glasübergangstemperatur (T<sub>g</sub>) zu Härtinge-Temperatur / Zeit



# Epoxidharzsystem SR 8100 / SD 8824 Wärmeformbeständigkeitstemperatur



## Sicherheitsdaten

<b>SR 8100</b>	<b>SD 8822/SD 8824</b>
<b>U362</b>	<b>U275</b>
Xi: Reizend	C: Aquat.
N: Umweltgefährlich	
R 36/38	R 21/22
R 43	R 34
R 51/53	R 43
S 28	S 22
S 37/39	S 26
S 61	S 28
	S 38
	S 45

Reiz der Augen und der Haut.  
Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich.  
Gefahr für Wasserorganismen, kann in Gewässern langfristige schädliche Wirkungen haben.  
Bei Berührung mit der Haut sofort abwaschen mit viel Wasser und Seife.  
Bei der Arbeit geeignete Schutzhandschuhe und Schutzhülle/Geschützte tragen.  
Freisetzung in die Umwelt vermeiden. Besondere Anweisungen siehe bei Gefahrstoffdatenblatt zu Rate ziehen.  
Gesundheitsschädlich bei Berührung mit der Haut und beim Verschlucken.  
Vermindert Verträglichkeit.  
Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich.  
Stark reizend/aquatisch.  
Bei Berührung mit den Augen gründlich mit Wasser spülen und mit Watte abtupfen.  
Bei Berührung mit der Haut sofort abwaschen mit viel warmem Seifenwasser.  
Bei versehentlichem Verschlucken ärztliche Hilfe anfordern.  
Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt anrufen (wenn möglich, diese Informationen mitgeben).

Composite Solutions AG  
Friedenstraße 10  
CH-3015 Bern  
Telefon: +41 31 688 4040  
Telefax: +41 31 688 4041  
info@compositesolutions.ch  
www.compositesolutions.ch

Bitte beachten Sie, falls bei einem uns und durch SDQM (SDQM SYSTEMS) zu Verfügung gestellten Informationen, dass es möglich ist, dass die Informationen, die nach diesem Wissen und Gewissen erstellt wurden, keine wirksame Empfehlung darstellen. Durch unser Wissen und Gewissen ist es nicht möglich, dass es sich um eine falsche oder unvollständige Information handelt. Wir übernehmen keine Haftung für Schäden, die aus der Verwendung unserer Informationen resultieren. Sollten Sie unsere Informationen bei der Entscheidung für oder gegen ein Produkt verwenden, so beachten Sie, dass die Verantwortung für die Entscheidung bei Ihnen liegt. Die Hersteller garantieren die Einhaltung der technischen Spezifikationen, jedoch nicht die Leistungsfähigkeit.